

E P . U S

P C T

国際調査報告

(法8条、法施行規則第40、41条)
[PCT18条、PCT規則43、44]

出願人又は代理人 の書類記号 NSK-138-PCT	今後の手続きについては、国際調査報告の送付通知様式(PCT/ISA/220)及び下記5を参照すること。	
国際出願番号 PCT/JP01/06232	国際出願日 (日.月.年) 18.07.01	優先日 (日.月.年) 18.07.00
出願人 (氏名又は名称) 日本精工株式会社		

国際調査機関が作成したこの国際調査報告を法施行規則第41条(PCT18条)の規定に従い出願人に送付する。
この写しは国際事務局にも送付される。

この国際調査報告は、全部で 3 ページである。

☐ この調査報告に引用された先行技術文献の写しも添付されている。

1. 国際調査報告の基礎

a. 言語は、下記に示す場合を除くほか、この国際出願がされたものに基づき国際調査を行った。

☐ この国際調査機関に提出された国際出願の翻訳文に基づき国際調査を行った。

b. この国際出願は、ヌクレオチド又はアミノ酸配列を含んでおり、次の配列表に基づき国際調査を行った。

☐ この国際出願に含まれる書面による配列表

☐ この国際出願と共に提出されたフレキシブルディスクによる配列表

☐ 出願後に、この国際調査機関に提出された書面による配列表

☐ 出願後に、この国際調査機関に提出されたフレキシブルディスクによる配列表

☐ 出願後に提出した書面による配列表が出願時における国際出願の開示の範囲を超える事項を含まない旨の陳述書の提出があった。

☐ 書面による配列表に記載した配列とフレキシブルディスクによる配列表に記載した配列が同一である旨の陳述書の提出があった。

2. ☐ 請求の範囲の一部の調査ができない(第I欄参照)。

3. ☐ 発明の単一性が欠如している(第II欄参照)。

4. 発明の名称は ☒ 出願人が提出したものを承認する。

☐ 次に示すように国際調査機関が作成した。

5. 要約は ☒ 出願人が提出したものを承認する。

☐ 第III欄に示されているように、法施行規則第47条(PCT規則38.2(b))の規定により国際調査機関が作成した。出願人は、この国際調査報告の発送の日から1カ月以内にこの国際調査機関に意見を提出することができる。

6. 要約書とともに公表される図は、

第 1 図とする。 ☒ 出願人が示したとおりである。

☐ なし

☐ 出願人は図を示さなかった。

☐ 本図は発明の特徴を一層よく表している。

THIS PAGE BLANK (USPTO)

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. ⁷ F16C33/62

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. ⁷ F16C33/00-66

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2001年

日本国登録実用新案公報 1994-2001年

日本国実用新案登録公報 1996-2001年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y	J P 2000-35043 A (日本精工株式会社) 2. 2月. 2000 (02. 02. 00), 【0017】「ルチル型酸化チタン層 ～ 軌道輪や転動体の素材は、主にチタン合金となる。」 【00 22】「 $\alpha + \beta$ 型、又は β 型合金」 (ファミリーなし)	1 2-7, 8-30
X Y A	J P 11-223221 A (日本精工株式会社) 17. 8月. 1999 (17. 08. 99), 【0069】 【0133】 (ファミリーなし)	1, 5 8-10 2-4, 6-7, 11-3 0
Y	J P 7-103247 A (光洋精工株式会社) 18. 4月. 1	27

☒ C欄の続きにも文献が列举されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

15. 10. 01

国際調査報告の発送日

23.10.01

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

藤原直欣



3W 8919

電話番号 03-3581-1101 内線 3366

THIS PAGE BLANK (USPTO)

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
	995 (18. 04. 95), 【0013】「シールド部材の表面には、例えば酸化チタン」(ファミリーなし)	
Y	日本国実用新案登録出願3-62312号(日本国実用新案登録出願公開5-14641号)の願書に添付した明細書及び図面の内容を記録したCD-ROM(光洋精工), 26. 2月. 1993 (26. 02. 93), 【0012】~【0014】(ファミリーなし)	7-30
Y	J P 11-247863 A (日本精工株式会社) 14. 9月. 1999 (14. 09. 99), 【0019】【0020】(ファミリーなし)	11-16
A	J P 11-153140 A (日本精工株式会社) 8. 6月. 1999 (08. 06. 99), (ファミリーなし)	1-30

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2002年1月31日 (31.01.2002)

PCT

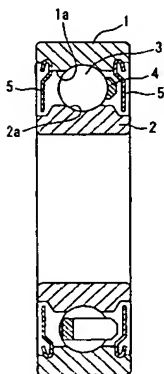
(10) 国際公開番号
WO 02/08623 A1

(51) 国際特許分類:	F16C 33/62	特願2000-336390 2000年11月2日 (02.11.2000) JP 特願2000-357514
(21) 国際出願番号:	PCT/JP01/06232	2000年11月24日 (24.11.2000) JP
(22) 国際出願日:	2001年7月18日 (18.07.2001)	特願2001-42901 2001年2月20日 (20.02.2001) JP 特願2001-77833 2001年3月19日 (19.03.2001) JP
(25) 国際出願の言語:	日本語	特願2001-146044 2001年5月16日 (16.05.2001) JP 特願2001-180507 2001年6月14日 (14.06.2001) JP
(26) 国際公開の言語:	日本語	(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 日本精工株式会社 (NSK LTD.) [JP/JP]; 〒141-8560 東京都品川区大崎1丁目6番3号 Tokyo (JP).
(30) 優先権データ:		(72) 発明者; および (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 植田光司 (UEDA, Koji) [JP/JP]. 宇山英幸 (UYAMA, Hideyuki) [JP/JP]. 齋藤 剛 (SAITO, Tsuyoshi) [JP/JP]; 〒251-8501 神奈川県
特願2000-217285 2000年7月18日 (18.07.2000) JP		
特願2000-230183 2000年7月31日 (31.07.2000) JP		
特願2000-230184 2000年7月31日 (31.07.2000) JP		
特願2000-312757 2000年10月13日 (13.10.2000) JP		

[続葉有]

(54) Title: ROLLING APPARATUS

(54) 発明の名称: 転動装置



(57) Abstract: Race rings wheels (1,2) of a rolling bearing are formed of any one titanium alloy of β , near β , and $\alpha + \beta$ titanium alloys. Titanium alloy has a surface hardness of Hv400 to Hv600 to enhance the corrosion resistance and wear resistance of the race rings wheels. A roller (3) which rolls over the race faces (1a,2a) of the race rings (1,2) is formed of a ceramic such as silicon nitride. Use of β titanium alloy or $\alpha + \beta$ titanium alloy subjected to solution treatment and oxidized at a low temperature of 400 to 600 ° makes it possible to produce race rings made of titanium alloy preferable to use in the environment which require corrosion resistance.

(57) 要約:

転がり軸受の軌道輪 1, 2 は、 β 型チタン合金、near β 型チタン合金、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金のいずれか 1 種類のチタン合金から形成されている。チタン合金は、軌道輪の耐食性および耐摩耗性を高めるために、Hv400 以上で Hv600 未満の表面硬さを有している。軌道輪 1, 2 の軌道面 1a, 2a 上を転動する球状の転動体 3 は、窒化珪素等のセラミックスから形成されている。軌道輪材料として、溶体化処理後の β 型チタン合金または $\alpha + \beta$ 型チタン合金に 400 ~ 600 °C の低温で酸化処理を施したものを使用すると、耐食性が要求される環境下での使用に好適なチタン合金製軌道輪が得られる。

WO 02/08623 A1



県藤沢市鵜沼神明一丁目5番50号 日本精工株式会社
内 Kanagawa (JP).

(74) 代理人: 森 哲也, 外(MORI, Tetsuya et al.); 〒101-0032 東京都千代田区岩本町二丁目3番3号 友泉岩本町ビル8階 日栄国際特許事務所 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (国内): JP, US.

(84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

添付公開書類:
— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明細書

転動装置

5 技術分野

本発明は、転がり軸受、ボールねじ、リニアガイド等の転動装置に関し、特に、半導体製造装置、化学繊維製造機、液晶パネル製造装置、電子線或いはX線を用いる機器等での使用に好適な転動装置に関する。

背景技術

- 10 玉軸受等の転がり軸受は、その軌道輪や転動体が高炭素クロム軸受鋼、肌焼鋼等の鉄鋼材料から形成されるのが一般的であるが、転がり軸受の使用環境は多種多様である。従って、食品機械や化学繊維製造機のように水や海水を扱う機械では、軸受内部に侵入した水や海水によって軌道輪や転動体の表面に錆が発生し、使用不能となることがあるため、軌道輪や転動体をSUS440C等のオーステナイト系ステンレス鋼から形成した転がり軸受が主に使用されている。
- 15

- このような転がり軸受は、水や海水に対する耐食性は良好であるが、硫酸等の酸性液やアルカリ性液などの化学薬品に対しては耐食性が良好であるとは言い難い。このため、硫酸等の酸性液やアルカリ性液などの化学薬品を扱う機械、例えば半導体製造装置や液晶パネル製造装置などでは、軌道輪がチタン合金で形成された転がり軸受を使用している場合が多い。しかし、チタン合金は通常の溶体化处理や時効処理を施しただけでは表面硬さが不足し、そのままでは転がり軸受の軌道輪材料として使用することができない。このため、チタン合金を転がり軸受の軌道輪材料として用いる場合には、何らかの方法でチタン合金の表面硬さを強化する必要がある。
- 20

- 25 チタン合金の表面硬さを強化する方法としては、従来、 β 型チタン合金の表面硬さをHv600以上の表面硬さに強化する方法が特開平11-223221号公報に開示されている。しかしながら、この公報に開示された方法によると β 型チタン合金の β 相に α 相を過剰に析出させねばならず、 α 相は β 相よりも耐食性に劣るため、使用環境によっては耐食性が不十分となる場合がある。また、上記

公報に開示された方法では、冷間加工後にショットピーニングを施す必要があり、冷間加工やショットピーニング等の工程が増えることによりコストアップを招くという問題もある。

また、半導体製造工程で使用される機器、例えば電子ビーム描画装置やウエハ
5 検査装置では、ウエハ上に回路パターンを描画する手段として、従来、レーザ光
を使用していたが、回路パターンの微細化に伴い、近年では、レーザ光よりも短
波長で高分解能の電子線が使用されるようになってきている。このような電子線
を用いた電子ビーム描画装置やウエハ検査装置などでは、周辺磁場に乱れがある
と電子線が容易に曲げられてしまい、描画精度や検査精度の低下を招くことがあ
10 る。従って、このような装置に転がり軸受を用いる場合には、軌道輪の回転によ
って周辺磁場が乱れることのない転がり軸受は必要とされ、このような要求を満
たすため、転がり軸受の軌道輪材料として、非磁性ステンレス鋼やベリリウム銅
を用いることが検討されている。

しかし、非磁性ステンレス鋼はその透磁率が1.04～1.002程度である
15 ため、転がり軸受の軌道輪材料として非磁性ステンレス鋼を用いた場合には、軌
道輪が僅かに磁化するだけでも周辺磁場に乱れを生じさせる可能性がある。一方、
ベリリウム銅はその透磁率が1.001以下であり、非磁性ステンレス鋼のよう
に周辺磁場に乱れを生じさせる可能性は低いが、ベリリウム銅を構成する元素や
その化合物の一部が環境負荷物質と認識されているため、使用に際して制約を受
20 けることがある。また、今後、更に環境問題が重視されることが予測され、ベリ
リウム銅そのものの使用が制限される可能性もある。さらに、ベリリウム銅は最
大硬さがHV400程度であり、高負荷の使用では早期摩耗が生じ易いという問
題もある。

本発明の目的

25 本発明の第1の目的は、より腐食性の強い環境下でも長期にわたって良好に
使用できる転動装置を提供することである。

本発明の第2の目的は、硫酸等の強酸性液や強アルカリ性液を扱う機械での使
用に好適な転動装置を提供することである。

本発明の第3の目的は、非磁性が要求される環境下でも長期にわたって良好に

使用できる転動装置を提供することである。

本発明の第4の目的は、ウエハ検査装置や核磁気共鳴診断装置のような、電子線あるいはX線を用いる機器での使用に好適な転動装置を提供することである。

本発明の第5の目的は、グリース等の潤滑剤を使用できない環境下でも長期にわたって良好に使用できる転動装置を提供することである。

本発明の概要

本発明に係る転動装置は、軌道面をそれぞれ有する外方部材及び内方部材と、前記外方部材または内方部材の回転運動もしくは直線運動により前記軌道面上を転動する転動体とを備えた転動装置であって、前記外方部材および／又は内方部材が β 型チタン合金、near型チタン合金、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金のいずれか1種類のチタン合金から構成されている。

本発明の好適な実施態様において、チタン合金はHv400以上でHv600未満の表面硬さを有している。また、チタン合金はHv420以上、好ましくはHv450以上の芯部硬さを有する共に酸素化合物層を表面に有し、該酸素化合物層はルチル型 TiO_2 を含むチタン酸化物からなり且つ20nm以上、好ましくは50nm以上の厚さを有している。

本発明の好適な実施態様において、転動体はチタン合金、窒化珪素、炭化珪素、ジルコニア系セラミックス、アルミナ系セラミックス、サイアロン系セラミックスのうちいずれか1種類の材料から構成される。

本発明の別の好適な実施態様において、転動装置は転動体を保持する保持器をさらに備え、該保持器は20W/(m·K)以上の熱伝導率を有している。また、保持器は、好ましくは、銅、テルル銅、黄銅、アルミ青銅、リン青銅、洋白、キュプロニッケル、ベリリウム銅のうちいずれか1種類の材料から構成される。

本発明の別の好適な実施態様において、外方部材、内方部材、転動体の少なくとも1つがチタン合金から構成され、チタン合金は結晶粒子の大きさが1 μ m以下、好ましくは800nm以下、さらに好ましくは10nm以下の ω 相を有している。

本発明の別の好適な実施態様において、外方部材および／又は内方部材は軌道面上に硬質膜を有している。硬質膜はTiN, TiC, TiCN, TiAlN,

CrN, SiC, ダイヤモンドライクカーボンのうち少なくとも1種類の材料から構成され、硬質膜が形成される軌道面は、Hv350以上、好ましくはHv450以上の表面硬さを有している。また、外方部材および／又は内方部材は、前記硬質膜上に0.1 μ m～10 μ m、好ましくは0.1 μ m～5 μ mの潤滑性膜を有している。

本発明の別の好適な実施態様において、転動体は超硬合金又はサーメットから構成され、かつ35W/(m·K)以上、好ましくは50W/(m·K)以上の熱伝導率を有している。

本発明の別の好適な実施態様において、転動体は鉄鋼材料から構成され、かつ耐食性を持つ表面硬化層を表面に有し、表面硬化層は、転動体を構成する母材の表面にクロム拡散浸透処理または窒化処理を施して形成されている。

本発明の別の好適な実施態様において、チタン合金は、そのヤング率をE (Gpa)、前記軌道面から転動体直径の2/100～5/100に相当する深さ位置までの最小硬さをH (Hv) としたとき、 $3.7 \leq (H/E)$ 、好ましくは $4.0 \leq (H/E)$ 、さらに好ましくは $(H/E) \leq 4.5$ の条件を満たすチタン合金である。

本発明の別の好適な実施態様において、前記チタン合金の線膨張係数 α_1 と前記転動体の線膨張係数 α_2 との比 α_2/α_1 が0.4～1.3の範囲内である。

本発明の別の好適な実施態様において、外方部材と内方部材との間に形成された開口を遮蔽するシールド板は純度99.5%以上のチタンから形成され、外方部材および内方部材はTiO_x (ただし、 $0 < x < 2$) からなる酸化被膜を表面に有している。

β 型チタン合金および $\alpha + \beta$ 型チタン合金は、 α 相が β 相へ変態する温度付近からチタン合金を溶体化処理して金属組織をほぼ β 相にした後、チタン合金に時効処理を施すと、 β 相に α 相が微細に析出することによって硬さが増大する。しかし、 α 相を時効処理によって析出させた場合には、 α 相の析出に伴って β 安定化合金元素が β 相中に濃縮される。このため、 α 相の析出量が多くなると、 α 相と β 相の耐食性の違いにより局所的な腐食が起こり易くなる。従って、より腐食性の強い環境下でも好適に使用し得るようするためには、 β 型チタン合金ある

$\alpha + \beta$ 型チタン合金中の β 相をある程度残留させる必要があるが、 β 相は α 相に比べ軟質のため、 β 相の量が多すぎると耐食性は良好となるものの耐摩耗性が不足する。

本発明者らは、チタン合金の溶体化処理及び時効処理について鋭意研究を行ったところ、チタン合金の表面硬さがHv 400以上でHv 600未満となるように、チタン合金に低温酸化処理を溶体化処理後に施すことによって、転がり軸受の軌道輪材料として良好なチタン合金が得られることを見出した。ここで、Hv 400以上600未満という硬さは、特殊環境用軸受材料として従来から使用されているSUS 630やYHD 50（商標名）などのステンレス鋼と同程度の硬さであるため、それほど高荷重が負荷されない環境下では、軌道輪受材料として十分に使用可能である。

軌道輪が転動体と接触する部分の表面は接触楕円と呼ばれる楕円形であり、その面積は非常に小さい。このため、軌道輪に応力が加わった場合には接触楕円に非常に大きな面圧が作用する。このことは、転がり軸受の軌道輪がチタン合金（ヤング率：約110 GPa）から形成され、かつ転動体がステンレス鋼（ヤング率：約200 GPa）から形成されている場合には、転動体よりも軌道輪のほうが大きく変形し、転動体と接触する接触楕円の面積が大きくなることを意味している。計算上では、チタン合金製軌道輪の接触楕円の面積は、ステンレス鋼製軌道輪のそれよりも大きく、チタン合金製軌道輪の接触楕円における最大接触面圧は、ステンレス鋼製軌道輪のそれよりも0.8倍程度になる。従って、チタン合金製軌道輪は、ステンレス鋼製軌道輪よりも転動体との接触面積が大きくなるため、接触面圧が下がり、転がり疲労が緩和されるので良好である。

しかし、チタン合金製軌道輪の表面硬さがHv 400未満になると、面圧が低くても、摩耗が急激に生じやすくなる。また、ゴミなどの異物が混入した際に圧痕が生じやすくなり、転がり軸受の寿命が短くなる。従って、チタン合金製軌道輪は表面硬さがHv 400以上である必要があるが、より耐摩耗性が要求される場合には、チタン合金製軌道輪の表面硬さをHv 450以上とすることが好ましい。更に、より耐食性或いは耐摩耗性が要求される場合には、窒化処理或いは酸化処理などの表面硬化熱処理によってチタン合金により高い硬度と耐食性を持た

せることができる。

チタン合金の透磁率は1.001以下であり、この値は、ほぼ完全な非磁性に近い値である。従って、軌道輪の回転によって周辺磁場が影響を受けないので、電子線やX線を用いる機器に良好に使用できるが、転動体や保持器が非磁性体で
5 ない場合には、これらが磁化することによって前述した装置の精度が低下する原因となる。従って、転動装置にほぼ完全な非磁性が要求される場合には、転動体や保持器の透磁率もチタン合金製軌道輪の透磁率と同様に1.001以下とする必要がある。

透磁率が1.001以下の転動体材料としては、チタン合金を始め、窒化珪素、
10 炭化珪素、ジルコニア系セラミックス、アルミナ系セラミックス、サイアロン系セラミックス等のセラミックスあるいはチタン合金などがある。また、透磁率が1.001以下の保持器材料としては、ポリアミド、フッ素樹脂等の樹脂あるいは黄銅、SUS304等の非磁性金属などがある。

これらの材料を子細に考察すると、SUS304に代表されるステンレス鋼製
15 保持器では、プレス加工時の加工誘起変態によってマルテンサイトが形成される。このため、保持器が磁化されやすくなり、保持器の回転によって磁場変動が大きくなる可能性がある。更に、近年では、非磁性ステンレス鋼の比透磁率1.01～1.1より低い透磁率、具体的には1.001程度が要求されており、非磁性ステンレス製保持器の使用が制限される場合もある。従って、転動体をセラミッ
20 クス製とし、保持器を銅系合金製とすることが望ましい。

チタン合金はほぼ完全な非磁性体であり、セラミックスも完全な非磁性体である。一方、銅合金は非磁性ステンレス鋼よりも透磁率の小さい非磁性材料で、比透磁率が1.001以下である。このため、磁場環境下で使用しても保持器の回転によって磁場変動が生じないため、非磁性環境下で使用される転動装置の金属
25 製保持器として好適である。

また、潤滑油やグリースを使用できない環境下や電子線機器や半導体製造装置のような非磁性且つ真空環境下で且つグリースを使用できないような状況でも、銅合金は自己潤滑性を有するため、転動体との接触面及び軌道輪案内面での摩擦特性が向上し、摩耗量が少ない。

また、銅合金製の保持器は熱伝導率が大きく、摺動案内面での熱の蓄積が生じないため、凝着摩耗を抑制することができる。さらに、銅合金は放熱性が高く、保持器の回転に伴って放熱が促進され、軸受の温度上昇を抑制することができる。これに対し、軌道輪がチタン合金製、保持器がSUS304等のオーステナイト系非磁性ステンレス鋼製である場合には、SUS304の熱伝導率と比熱が小さいため、保持器と軌道輪案内面との間の摺動箇所では局部的に著しく温度が上昇し、軌道輪の凝着摩耗が生じやすい。SUS304等のオーステナイト系非磁性ステンレス鋼の熱伝導率が $16\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であることから、銅合金製保持器としては $20\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上、更に望ましくは $35\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上の熱伝導率を有する銅合金製保持器とすることが好ましい。

銅合金の種類としては、純銅、テルル銅、黄銅、快削黄銅、高力黄銅、アルミ青銅等の銅合金铸件、又は純銅、テルル銅、リン青銅、洋白、キュープロニックルのような展伸用銅合金、或いは析出硬化型のベリリウム銅等、熱伝導率が $20\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上の銅合金であれば何れも好適に使用できる。但し、純銅あるいはテルル銅のような低合金は、強度や硬さが低いので、特に耐摩耗性を重視する場合には、これらを除いた銅合金を使用するのが望ましい。

酸化処理や窒化処理などの表面処理は、化合物の厚さの確保および侵入した元素の拡散促進のため、 600°C 以上の高温での処理が必要とされている。しかし、チタン合金を酸素あるいは酸素元素を有するガス中で所定の時間加熱すると、チタンは酸素との親和力が強いため、 $400\sim 600^\circ\text{C}$ の比較的低い温度でも表面に TiO_2 、 Ti_3O 等の酸素化合物を生成する。

酸化処理によってチタン合金の表面に生成される TiO_2 等の酸素化合物は、化学的に非常に安定な物質である。一方、チタン合金はその表面が転動体等の摺動により極めて活性になりやすく、それによって凝着摩耗などを生じやすいため、耐摩耗性に劣ると考えられている。しかし、チタン合金に酸化処理を施すことにより表面が化学的に極めて安定した化合物によって覆われるため、表面の活性化が抑制され、その結果として焼付きが起こりにくくなり、摺動性および耐摩耗性が向上する。

また、酸化処理によってチタン合金の表面に形成される酸素化合物層の厚さが

20 nm以上になると、負荷容量が増加し、摺動性および耐摩耗性の効果が著しく向上する。ただし、酸素化合物層の厚さが20 nm未満であると、耐摩耗性および摺動性を向上させる効果が小さい。よって、酸素化合物層の厚さは20 nm以上とすることが望ましい。また、より良好な耐摩耗性および摺動性を得るため

5 には、酸素化合物層の厚さを50 nm以上とすることが好ましい。

チタン合金を700℃以上の高温で酸化処理すると、チタン合金の表面に生成される酸素化合物層は硬度の高いルチル型 TiO_2 が主となり、酸素化合物層の厚さも増大する。このため、高負荷に対する耐久性は向上するが、その反面、チタン合金の表面粗さが劣化し、軸受の回転トルクが上昇してしまう場合がある。

10 また、 TiO_2 を主成分とする酸素化合物層は脆く、母材から剥離し易い。

一方、チタン合金を400～600℃の低温で酸化処理すると、チタン合金の表面に形成される酸素化合物層は、ルチル型 TiO_2 と Ti_3O 等の TiO_x 酸化物(x ; $0 < x < 2$) および Ti とが混在する状態になり、ルチル型 TiO_2 を主とする酸素化合物層に比べて緻密となる。このため、酸化処理後の表面粗さが良好になり、その結果として、軸受の回転トルクも低くなり、化合物層の脱離などが生じにくい。

図10Aは、 β 型チタン合金および $\alpha + \beta$ 型チタン合金の硬化法として、一般に行われる溶体化処理と時効処理の熱処理工程を示したものであり、この熱処理方法では、チタン合金が急激に酸化しやすいため、高真空雰囲気あるいはアルゴン等の不活性ガス雰囲気で加熱されることが多い。

図10Bは、高温でのガス酸化処理を示したものである。この場合、酸化処理後にそのまま使用される場合が多いが、溶体化処理と時効処理をせずに高温で長時間加熱するため、芯部硬さが低くなり、転がり寿命に悪影響を及ぼす場合がある。また、前述したように表面粗さの劣化や化合物層の脆化を引き起こすおそれもある。

図10Cは、溶体化処理されたチタン合金を400～600℃の低温で酸化処理する方法を示したものである。400～600℃という酸化処理温度は、 β 型チタン合金および $\alpha + \beta$ 型チタン合金を溶体化処理後に時効処理するときの温度と同一温度範囲内にあるため、酸化処理と時効処理を兼ねることができる。その

ため、工数増加によるコストアップを招くこともない。

また、時効処理によってチタン合金の表面だけでなく、チタン合金の芯部硬さもHv420以上まで向上するため、転がり寿命が向上する。また、処理温度が低い場合、熱変形が小さく、軌道輪の寸法精度を低下させる可能性が少ない。ただし、芯部硬さがHv420未満であると、表面に酸素化合物層を有していても軸受の転がり寿命を延長させる効果は少ないため、時効処理を兼ねる酸化処理によって得られる芯部硬さをHv420以上とすることが望ましい。また、より安定した転がり寿命の延長効果を得るためには、チタン合金の芯部硬さをHv450以上とすることが好ましい。

- 10 酸化処理を行うガス雰囲気は、酸素あるいは酸素元を有するガス中で行う。例えば、大気中、90%N₂+10%O₂ガス中あるいはArガスに所定量のH₂Oガスを混合させたガス中などである。ただし、酸化処理を施すことによって、表面にルチル型TiO₂を含み、厚さが20nm以上の酸素化合物層を形成することができれば、酸化処理雰囲気のガスの種類は問わない。また、急激な酸化を防ぐため、加熱炉内を減圧した状態で前記ガスを使用し、酸化処理を行うこともできる。

- 20 酸化処理を施すチタン合金としては、溶体化処理と時効処理によって硬度が上昇する $\alpha + \beta$ 型チタン合金あるいは β 型チタン合金が好適に使用し得る。たとえば、Ti-6Al-4V、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al、Ti-22V-4Al、Ti-15Mo-5Zr-3Alなどである。ただし、酸化処理を施すことによって、表面にルチル型TiO₂を含み、厚さが20nm以上の酸素化合物層を形成し、芯部硬さがHv420以上となるチタン合金であれば、種類は問わない。

図面の簡単な説明

- 25 図1は本発明の一実施形態に係る転がり軸受の縦断面図で、
図2は転がり軸受の転がり寿命を試験するときに用いられる試験装置を示す図で、
図3は転がり軸受の耐食性試験結果とチタン合金製軌道輪の表面硬さとの関係を示す図で、

図4は転がり軸受の転がり寿命試験結果とチタン合金製軌道輪の表面硬さとの関係を示す図で、

図5は周辺磁場の磁束密度変化を測定するための方法を示す図で、

図6は図5に示されるテスラーメータから出力される信号波形を示す図で、

5 図7はチタン合金製軌道輪の耐摩耗性を試験する方法を示す図で、

図8はチタン合金製軌道輪の耐摩耗性試験結果と酸素化合物層厚さとの関係を示す図で、

図9は転がり軸受の転がり寿命試験結果とチタン合金製軌道輪の芯部硬さとの関係を示す図で、

10 図10Aはチタン合金を硬化させるときの従来方法を示す図で、

図10Bはチタン合金を高温酸化処理により硬化させるときの方法を示す図で、

図10Cはチタン合金を低温酸化処理により硬化させるときの方法を示す図で、

図11Aはサバン式摩耗試験機の側面図で、

図11Bはサバン式摩耗試験機の正面図で、

15 図12は本発明の他の実施形態に係る転がり軸受の部分断面図で、

図13はチタン合金製軌道輪に施されるガス窒化処理を説明するための図で、

図14はチタン合金製軌道輪の表面に硬質膜を形成する装置の概略図で、

図15はスラスト転がり軸受の耐久性を試験するときに用いられる試験装置の断面図で、

20 図16はチタン合金製軌道輪の表面硬さと同軌道輪の表面に形成された硬質膜の剥離寿命との関係を示す図で、

図17はラジアル転がり軸受の真空中での耐久性を試験するための装置の概略図で、

図18は転動体の熱伝導率と摩耗比との関係を示す図で、

25 図19は本発明の他の実施形態に係る転がり軸受の断面図で、

図20は転がり軸受の耐圧痕性試験結果と H/E との関係を示す図で、

図21は転がり軸受の転がり寿命試験結果と H/E との関係を示す図で、

図22は環境温度の変動パターンを示す図で、

図23は軌道輪の線膨張係数と転動体の線膨張係数との比と転がり軸受の転が

り寿命との関係を示す図で、

図 2 4 は本発明の他の実施形態に係る転がり軸受の断面図で、

図 2 5 は転がり軸受の耐摩耗性試験をするための試験装置の概略図である。

本発明の説明

- 5 添付図面を参照して、本発明の転動装置をより詳細に説明する。

図 1 は、本発明の一実施形態に係る転がり軸受の断面図である。図 1 に示される転がり軸受は、呼び番号 6 0 0 1（内径 1 2 mm、外径 2 8 mm、幅 8 mm）の玉軸受であって、外輪 1、内輪 2、転動体 3、保持器 4 及びシール 5 を備えて構成されている。

- 10 軌道輪 1，2 は、T i - 6 A l - 4 V、T i - 1 5 M o - 5 Z r - 3 A l、T i - 1 5 M o - 5 Z r 等のうちいずれか 1 種類のチタン合金から形成されている。球状の転動体 3 は軌道輪 1，2 の一方が回転すると軌道輪 1，2 の転動面 1 a，2 a 上を転がり運動する。転動体 3 は窒化珪素から形成され、転動体 3 を保持する保持器 4 はフッ素樹脂から形成されている。

- 15 チタン合金からなる軌道輪 1，2 は、所定の形状に切削加工された後、溶体化処理及び時効処理が施されている。軌道輪 1，2 の転動面 1 a，2 a は、溶体化処理及び時効処理を施した後に研削加工が施されている。溶体化処理は、チタン合金が T i - 6 A l - 4 V である場合には 9 5 0 ° C ~ 1 0 0 0 ° C の温度で、またチタン合金が T i - 1 5 M o - 5 Z r - 3 A l または T i - 1 5 M o - 5 Z r の
20 場合には 8 0 0 ° C ~ 8 5 0 ° C の温度でチタン合金を 1 時間保持した後、チタン合金を水冷して溶体化処理を行った。

チタン合金の時効処理は、全て 3 5 0 ° C ~ 5 0 0 ° C、3 時間 ~ 4 0 時間の処理条件で行った。冷却は、通常空冷で行ったが、析出組織を微細にして、硬さを向上させる必要があるチタン合金については、炉冷によって冷却速度を遅くした。

- 25 また、より均一微細に α 相を析出させる必要があるチタン合金については、まず 4 2 5 ° C、1 7 時間の条件で時効処理し、さらに 4 7 5 ° C、7 時間の条件で時効処理する、二段時効処理を用いた。

[耐食性試験]

表 1 に示される軌道輪材料で試験片を作製し、作製した各試験片に対して次の

ような耐食性試験を行った。すなわち、表 1 の各試験片を約 25℃の 5 N-H₂SO₄ 硫酸液中に浸漬し、硫酸液に浸漬する前と硫酸液に約 24 時間浸漬した後の試験片の重量を測定し、硫酸液による重量の減少量を評価した。

表 1

	No.	軌道輪材料	時効処理条件	表面硬さ (Hv)	硫酸中 腐食減量 (g)	塩水中 転がり寿命比
実施例	1	Ti-6Al-4V	500°C × 6h	406	0.0002	2.2
	2	Ti-6Al-4V	450°C × 20h (炉冷)	427	0.0002	2.5
	3	Ti-15Mo-5Zr-3Al	450°C × 16h	453	0.0001	2.4
	4	Ti-15Mo-5Zr-3Al	425°C × 17h + 475°C × 7h (炉冷)	479	0.0001	2.9
	5	Ti-15Mo-5Zr	450°C × 20h (炉冷)	552	0.0002	3.0
	6	Ti-15Mo-5Zr	350°C × 40h	592	0.0001	3.5
比較例	1'	Ti-6Al-4V	500°C × 3h	361	0.0002	1.0
	2'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	450°C × 8h	393	0.0001	1.3
	3'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	冷間加工 + 450°C × 20h	605	0.0005	3.2
	4'	Ti-15Mo-5Zr	冷間加工 + 450°C × 20h	615	0.0008	3.7
	5'	Ti-15Mo-5Zr	冷間加工 + 350°C × 40h	630	0.001	3.5
	6'	SUS440C	—	670	0.5	0.9
	7'	SUS630	—	455	0.1	1.2
	8'	ベリリウム銅	—	397	0.009	1.0

[転がり寿命試験]

次に、表 1 に示される材料で試験用の転がり軸受を作製し、作製した各試験軸受に対して、次のような転がり寿命試験を 5 重量%濃度の NaCl 水溶液中で行った。すなわち、図 2 に示されるように、試験機の回転軸 13 に試験軸受 10 を

5 セットした後、試験軸受 10 にスプリング 14 とワイヤ 15 とによって約 19.6 N のアキシャル荷重と約 49 N のアキシャル荷重を負荷し、この状態でモータ 12 により回転軸 13 を約 1000 rpm の速度で回転させた。そして、試験軸受の内輪を所定の回数だけ回転させた後、転動面の摩耗量を測定した。

耐食性試験の試験結果（重量減少量）を表 1 に、また耐食性試験の試験結果と

10 チタン合金の表面硬さとの関係を図 3 に示す。

表 1 及び図 3 からわかるように、本発明の実施例に相当する No. 1 ～ 6 は、比較例である No. 6' ～ 8' に比較して硫酸液中での重量減少量が低い値を示している。これは、No. 6' ～ 8' は軌道輪がステンレス鋼やベリリウム銅から形成されているのに対し、No. 1 ～ 6 は軌道輪がチタン合金から形成されているためである。

15

また、本発明の実施例に相当する No. 1 ～ 6 は、比較例である No. 3' ～ 5' に比較して硫酸液中での重量減少量が低い値を示している。これは、No. 3' ～ 5' はチタン合金製軌道輪の表面硬さが Hv 600 以上であるのに対し、No. 1 ～ 6 はチタン合金製軌道輪の表面硬さが Hv 600 未満のためである。

20 次に、転がり寿命試験の試験結果（転がり寿命比）を表 1 に、また転がり寿命試験の試験結果とチタン合金製軌道輪の表面硬さとの関係を図 4 に示す。なお、表 1 及び図 4 の転がり寿命比は、No. 1' の転がり寿命を 1 として評価した場合の比較値である。

表 1 及び図 4 からわかるように、本発明の実施例に相当する No. 1 ～ 6 は、比較例である No. 1' 及び 2' に比較して、塩水中での転がり寿命比が高い数値を示している。これは、No. 1' ～ 2' はチタン合金製軌道輪の表面硬さが Hv 400 未満であるのに対し、No. 1 ～ 6 はチタン合金製軌道輪の表面硬さが Hv 400 以上のためである。

25

以上のことから、転がり軸受の軌道輪をチタン合金製とし、軌道輪材料の表面

硬さをHv600未満でHv400以上とすることにより、塩水や硫酸等の腐食性流体に対して耐食性が要求される環境下でも長期にわたって好適に使用できる転がり軸受を得られることがわかる。

〔磁束密度変化測定試験〕

- 5 表2A及び表2Bに示される材料で試験用の転がり軸受を作製し、作製した各試験軸受に対して次のような磁束密度変化測定試験を行った。すなわち、図5に示されるように、永久磁石16の磁界中に配置された回転軸13に試験軸受10を取り付けた後、回転軸13を約500rpmの速度で回転させ、そのときの磁束密度の変化をテスラーメータ17で測定した。そして、テスラーメータ17の
- 10 出力（図6参照）が最大で0.1mT以上になったものを磁束密度の変化が有りとし、0.1mT未満のものを磁束密度の変化が無しとした。

磁束密度変化測定試験の試験結果を表2Aに、また表2Aに示した材料の透磁率を表2Bに示す。

表 2 A

	試験No.	軌道輪	転動体	保持器	磁束密度変化
実施例	11	Ti-6Al-4V	Si ₃ N ₄	樹脂	無し
	12	Ti-6Al-4V	アルミナ系セラミックス	樹脂	無し
	13	Ti-15Mo-5Zr-3Al	Si ₃ N ₄	樹脂	無し
	14	Ti-15Mo-5Zr-3Al	SiC	樹脂	無し
	15	Ti-15Mo-5Zr	Si ₃ N ₄	樹脂	無し
	16	Ti-15Mo-5Zr	ジルコニア系セラミックス	樹脂	無し
比較例	11'	Ti-6Al-4V	Si ₃ N ₄	SUS304	有り
	12'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	SUS440C	樹脂	有り
	13'	Ti-15Mo-5Zr	SUS440C	樹脂	有り
	14'	ベリリウム銅	Si ₃ N ₄	SUS304	有り
	15'	非磁性ステンレス	Si ₃ N ₄	樹脂	有り

表 2 B

	材質	透磁率
軌道輪	Ti-6Al-4V	1.001以下
	Ti-15Mo-5Zr-3Al	1.001以下
	Ti-15Mo-5Zr	1.001以下
	ベリリウム銅	1.001以下
	非磁性ステンレス	1.001より大
転動体	Si ₃ N ₄	1.001以下
	SiC	1.001以下
	ジルコニア系セラミックス	1.001以下
	アルミナ系セラミックス	1.001以下
	SUS440C	1.001より大
保持器	樹脂	1.001以下
	SUS304	1.001より大

表 2 A の試験結果からわかるように、本発明の実施例に相当する No. 1 ~ 6 は、比較例である No. 1 1' 及び 1 4' に比較して磁束密度の変化が小さい。これは、No. 1 1' 及び 1 4' は保持器が SUS 3 0 4 で形成されているのに対し、No. 1 ~ 6 は保持器が樹脂で形成されているためである。

- 5 また、本発明の実施例に相当する No. 1 ~ 6 は、比較例である No. 1 2' 及び 1 3' に比較して磁束密度の変化が小さい。これは、No. 1 2' 及び 1 3' は転動体が SUS 4 4 0 C で形成されているのに対し、No. 1 ~ 6 は転動体が窒化珪素等のセラミックスで形成されているためである。

- 10 さらに、本発明の実施例に相当する No. 1 ~ 6 は、比較例である No. 1 5' に比較して磁束密度の変化が小さい。これは、No. 1 5' は軌道輪が非磁性ステンレス鋼で形成されているのに対し、No. 1 ~ 6 は軌道輪がチタン合金で形成されているためである。

- 15 したがって、軌道輪をチタン合金製とし、転動体をセラミックス製とし、保持器を樹脂製とすることにより、軸受の回転によって周辺磁場の磁束密度が大きく変化することがないので、非磁性が要求される環境下での使用に良好な転がり軸受を得られることがわかる。

[保持器摩耗試験]

- 20 表 3 に示される材料で保持器を作製し、これを軌道輪が Ti - 1 5 Mo - 5 Zr - 3 Al からなり、転動体が Si_3N_4 からなる試験軸受に組み込み、保持器の摩耗試験を実施した。具体的には、回転速度：200 rpm、ラジアル負荷荷重：49.0 N、アキシャル負荷荷重：19.6 N、真空度： 1×10^{-5} Torr、潤滑：無潤滑の条件で各試験軸受を回転させた。そして、試験軸受を回転させる前の保持器の重量と試験軸受の回転が 1×10^7 に達した時点で保持器の重量とを測定し、その差を保持器の摩耗量として評価した。

ここで使用した試験軸受のチタン合金製軌道輪は、Hv 480以上の表面硬さを得るために、800～850℃×1時間の条件で溶体化処理した後、水冷し、次いで425℃×20時間の条件で1回目の時効硬化処理を施し、さらに475℃×7時間の条件で2回目の時効硬化処理を施したチタン合金から形成したものである。

表3のNo.33「エコプラス」は三宝伸銅工業株式会社製の商品名である。

保持器摩耗試験の試験結果（摩耗比）を表4に示す。表4における各保持器の摩耗比は、No.21'の摩耗量を1として評価した場合の比較値である。

表 4

		保持器材料	比透磁率	磁場変動	熱伝導率 W/(m·K)	摩耗比
実施例	21	YBsC1	1.001以下	無	159	0.75
	22	YBsC2	↑	↑	115	0.69
	23	HBsC1	↑	↑	87	0.56
	24	HBsC2	↑	↑	123	0.54
	25	AlBC1	↑	↑	50	0.45
	26	AlBC3	↑	↑	36	0.48
	27	LBC3	↑	↑	47	0.75
	28	LBC4	↑	↑	52	0.81
	29	C5191	↑	↑	80	0.55
	30	C5210	↑	↑	63	0.52
	31	C17200	↑	↑	84	0.1
	32	キューロニッケル	↑	↑	29	0.75
	33	エコプラス	↑	↑	38	0.24
	34	C1100	↑	↑	390	0.88
	35	C14500	↑	↑	380	0.87
比較例	21'	SUS304	1.001以上	有	15	1
	22'	SPCC	↑	↑	59	1.3

表4の試験結果からわかるように、本発明の実施例に相当するNo.21～35は、比較例であるNo.21'に比較して摩耗比が低い値を示している。これは、No.21'は保持器材料（ステンレス鋼）の熱伝導率が $20\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 未満であるのに対し、No.21～35は保持器材料（銅合金）の熱伝導率が $20\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上のためである。

また、本発明の実施例に相当するNo.21～35は、比較例であるNo.22'に比較して磁束密度の変化が小さい。これは、No.22'は保持器材料の比透磁率が1.001を超える値であるのに対し、No.21～35は保持器材料の比透磁率が1.001以下のためである。

したがって、保持器材料の熱伝導率を $20\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上とし、かつ保持器材料の比透磁率を1.001以下とすることにより、グリース等の潤滑剤を使用できず、かつ非磁性が要求される環境下でも好適に使用できる転がり軸受を得ることができる。

[摩耗評価試験]

表5に示される材料で直径50mmの円板状試験片を作製し、各試験片に対して摩耗評価試験を実施した。具体的には、図7に示すように、円板状試験片33の表面に負荷荷重を窒化珪素製転動体31を介して負荷し、試験片33への負荷荷重を20N～90Nの範囲で徐々に上昇させながら黄銅製保持器32を1000rpmの速度で回転させた。そして、保持器32の回転抵抗が $0.69\text{ N} \cdot \text{m}$ に達した時点での負荷荷重を焼付荷重として評価すると共に試験片表面の最大摩耗痕深さを測定した。このとき、負荷荷重が98Nを超えても保持器32の回転抵抗が $0.69\text{ N} \cdot \text{m}$ に達しなかった場合には、負荷荷重が98Nに達した時点

を保持器32の回転抵抗として焼付荷重を評価した。

摩耗評価試験によって得られた各試験片の焼付荷重と最大摩耗痕深さを表5に示す。

表 5

	No.	試験片材料	酸化処理条件	化合物種類 (Ox<2)	化合物層厚さ (nm)	芯部硬さ (Hv)	焼付荷重 (N)	98N時回転抵抗 (N・m)	最大摩耗痕深さ (μ m)
実施例	36	Ti-6Al-4V	500°C×40h	TiO ₂ , TiOx	75	455	98<	0.23	1
	37	Ti-6Al-4V	550°C×20h	TiO ₂ , TiOx	80	429	98<	0.22	1
	38	Ti-6Al-4V	600°C×10h	TiO ₂ , TiOx	95	421	98<	0.24	1
	39	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	475°C×50h	TiO ₂ , TiOx	65	430	98<	0.2	1
	40	Ti-22V-4Al	475°C×50h	TiO ₂ , TiOx	70	441	98<	0.21	1
	41	Ti-15Mo-5Zr-3Al	400°C×60h	TiO ₂ , TiOx	25	467	98<	0.18	2
	42	Ti-15Mo-5Zr-3Al	450°C×60h	TiO ₂ , TiOx	55	503	98<	0.17	1
	43	Ti-15Mo-5Zr-3Al	500°C×60h	TiO ₂ , TiOx	90	452	98<	0.21	1
比較例	36'	Ti-6Al-4V	時効処理のみ	—	0	429	35	—	7
	37'	Ti-6Al-4V	600°C×20h	TiO ₂ , TiOx	110	411	61	—	5
	38'	Ti-6Al-4V	700°C×20h	TiO ₂	1800	373	98<	0.46	2
	39'	Ti-22V-4Al	時効処理のみ	—	0	480	43	—	6
	40'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	400°C×20h	TiO ₂ , TiOx	15	448	46	—	4
	41'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	300°C×40h	TiO ₂ , TiOx	10	384	38	—	6
	42'	SUS630	—	—	0	465	98<	0.42	4
	43'	YHD50	—	—	0	432	98<	0.45	5
	44'	Be-Cu	—	—	0	418	98<	0.36	8

表5の試験結果からわかるように、No.36～43のチタン合金製試験片は、No.36'及びNo.39'のチタン合金製試験片に比較して焼付荷重が大きい。これは、No.36'及びNo.39'のチタン合金製試験片はその表面に酸素化合物層が形成されていないのに対し、No.36～43のチタン合金製試験片はその表面に酸素化合物層が形成されているためである。

また、No.36～43のチタン合金製試験片は、No.38'のチタン合金製試験片に比較して、負荷荷重が98Nに達した時点での保持器の回転抵抗が小さい。これは、No.38'チタン合金製試験片は酸素化合物層が TiO_x ($0 < x < 2$)を含んでいないのに対し、No.36～43のチタン合金製試験片は酸素化合物層が TiO_2 と TiO_x とを含んでいるためである。

さらに、No.36～43のチタン合金製試験片は、No.40'及びNo.41'のチタン合金製試験片に比較して焼付荷重が大きい。これは、No.40'及びNo.41'のチタン合金製試験片は酸素化合物層の厚さが20nm未満であるのに対し、No.36～43のチタン合金製試験片は酸素化合物層の厚さが20nm以上であるためである。

また、No.36～43のチタン合金製試験片は、No.37'のチタン合金製試験片に比較して焼付荷重が大きい。これは、No.37'のチタン合金製試験片は酸素化合物層の厚さが110nmであるのに対し、No.36～43のチタン合金製試験片は酸素化合物層の厚さが95nm以下であるためである。

以上のことから、チタン合金製軌道輪の表面に TiO_x を含む酸素化合物層を形成することにより、チタン合金製軌道輪の耐摩耗性を高められることがわかる。また、酸素化合物層の厚さを20nm以上で95nm以下することにより、チタン合金製軌道輪の耐摩耗性をさらに高められることがわかる。

表5に示した酸素化合物層の厚さとチタン合金製試験片の最大摩耗痕深さとの関係を図8に示す。同図に示されるように、酸素化合物層の厚さが20nm以上になると最大摩耗痕深さが約 $2\mu m$ 以下となり、酸素化合物層の厚さが50nm以上になると最大摩耗痕深さが約 $1\mu m$ 以下となる。したがって、酸素化合物層の厚さを20～95nm、好ましくは50～95nmとすることにより、チタン合金製軌道輪の耐摩耗性をより高めることができる。

[転がり寿命試験]

表 6 に示される材料で軌道輪を作製し、これを転動体が Si_3N_4 からなり、保持器がフッ素樹脂からなる試験軸受に組み込み、転がり軸受の水中転がり寿命試験をラジアル荷重：98 N、アキシアル荷重：20 N、回転速度：1000 r

5 p m、潤滑：無潤滑の条件で行った。

上記の水中転がり寿命試験によって得られた各試験軸受の転がり寿命を表 6 に示す。表 6 の転がり寿命比は、No. 44' の転がり寿命を 1 として評価した場合の比較値である。

表 6

	No.	試験片材料	酸化処理条件	化合物種類 ($0 < x < 2$)	化合物層厚さ (nm)	芯部硬さ (Hv)	転がり寿命比
実施例	36	Ti-6Al-4V	500°C × 40h	TiO ₂ , TiOx	75	455	3.0
	37	Ti-6Al-4V	550°C × 20h	TiO ₂ , TiOx	80	429	3.2
	38	Ti-6Al-4V	600°C × 10h	TiO ₂ , TiOx	95	421	2.8
	39	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	475°C × 50h	TiO ₂ , TiOx	65	430	3.1
	40	Ti-22V-4Al	475°C × 50h	TiO ₂ , TiOx	70	441	2.9
	41	Ti-15Mo-5Zr-3Al	400°C × 60h	TiO ₂ , TiOx	25	467	3.5
	42	Ti-15Mo-5Zr-3Al	450°C × 60h	TiO ₂ , TiOx	55	503	3.2
	43	Ti-15Mo-5Zr-3Al	500°C × 60h	TiO ₂ , TiOx	90	452	3.5
比較例	36'	Ti-6Al-4V	時効処理のみ	—	0	429	1.6
	37'	Ti-6Al-4V	600°C × 20h	TiO ₂ , TiOx	110	411	2.1
	38'	Ti-6Al-4V	700°C × 20h	TiO ₂	1800	373	1.9
	39'	Ti-22V-4Al	時効処理のみ	—	0	480	1.7
	40'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	400°C × 20h	TiO ₂ , TiOx	15	448	1.9
	41'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	300°C × 40h	TiO ₂ , TiOx	10	384	1.4
	42'	SUS630	—	—	0	465	1.4
	43'	YHD50	—	—	0	432	1.2
	44'	Be-Cu	—	—	0	418	1.0

表6の試験結果からもわかるように、No.36～43の試験軸受は、No.36'及びNo.39'の試験軸受に比較して、転がり寿命比が高い値を示している。これは、No.36'及びNo.39'の試験軸受はチタン合金製軌道輪の表面に酸素化合物層が形成されていないのに対し、No.36～43の試験軸受はチタン合金製軌道輪の表面に酸素化合物層が形成されているためである。また、No.36～43の試験軸受は、No.38'の試験軸受に比較して、転がり寿命比が高い値を示している。これは、No.38'の試験軸受は酸素化合物層に TiO_x ($0 < x < 2$) が含まれていないのに対し、No.36～43の試験軸受は酸素化合物層に TiO_x ($0 < x < 2$) が含まれているためである。さらに、No.36～43の試験軸受は、No.40'及びNo.41'の試験軸受は比較して転がり寿命が優れている。これは、No.40'及びNo.41'の試験軸受は酸素化合物層の厚さが20nm未満であるのに対し、No.36～43の試験軸受は酸素化合物層の厚さが20nm以上であるためである。

表6に示した各試験軸受の転がり寿命比とチタン合金製軌道輪の芯部硬さとの関係を図9に示す。同図に示されるように、チタン合金製軌道輪の芯部硬さがHv420未満では軸受の転がり寿命が比較値で2.0程度となるが、チタン合金製軌道輪の芯部硬さがHv420以上では軸受の転がり寿命が比較値で3.5程度となる。したがって、チタン合金製軌道輪の芯部硬さをHv420以上とすることにより、転がり軸受の転がり寿命を高められることがわかる。

次に、表7に示す材料で試験片を作製し、No.1～14の試験片に対して同表に示す条件で溶体化処理と時効処理を施した。そして、これらの試験片を用いて、 ω 相の粒子径の測定、ビッカース硬さ試験、塩水噴霧試験、サバン式摩耗試験を行った。

表 7

No.	合金の種類	溶体化処理条件	時効処理条件
1	Ti-6Al-4V	950°Cで1h保持後、水冷	420°Cで10h保持後、空冷
2	Ti-15Mo-5Zr-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	350°Cで50h保持後、空冷
3	Ti-15Mo-5Zr-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	400°Cで15h保持後、空冷
4	Ti-15Mo-5Zr-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	450°Cで10h保持後、空冷
5	Ti-15Mo-5Zr-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	475°Cで10h保持後、炉冷
6	Ti-15Mo-5Zr-3Al	780°Cで1h保持後、空冷	450°Cで50h保持後、空冷
7	Ti-15Mo-5Zr-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	50%冷間圧延後に 475°Cで7h保持後、炉冷
8	Ti-15Mo-5Zr-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	70%冷間圧延後に 475°Cで7h保持後、炉冷
9	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	400°Cで15h保持後、空冷
10	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	450°Cで10h保持後、空冷
11	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	500°Cで7h保持後、空冷
12	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	450°Cで100h保持後、空冷
13	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	800°Cで1h保持後、水冷	400°Cで0.1h保持後、空冷
14	SUS440C	1050°Cで1h保持後、油冷	170°Cで2h保持(焼戻)
15	Be-Cu	溶体化処理無し	350°Cで2h保持後、空冷

[ω 相の粒子径測定]

透過型電子顕微鏡による観察用の試験片を用いて、日本電子（株）製の透過型電子顕微鏡「JEM-2010」により、暗視野像にて試験片断面の結晶組織を観察し、 ω 相の粒子径を測定した。観察の結果、チタン合金の結晶組織は、No. 1～10, 13では、($\beta + \omega$) 相または ($\beta + \omega + \alpha$) 相となっていたが、No. 11では ($\beta + \alpha$) 相となっていた。

[ビッカース硬さ試験]

試験片の断面を鏡面状態に研磨した後、マイクロビッカース硬度測定器により試験片の鏡面に圧子を当て、荷重100gの条件で測定した。

10 [塩水噴霧試験]

「JIS Z2371」に準拠し、温度35℃で5重量%濃度のNaCl水溶液を用い、1週間経過後の試験片の外観を目視にて観察した。この観察により、錆の発生が認められなかったものを耐食性が良好（○）、錆の発生が認められたものを耐食性が不良（×）と評価した。

15 [サバン式摩耗試験]

図11A及び図11Bに示すように、前述のようにして作製した各種合金からなる固定試験片21と、Si₃N₄からなる回転試験片22とをサバン式摩耗試験機に取り付け、荷重用の重りとバランス用の重りにより固定試験片21を回転試験片22の外周面に押し付けながら、無潤滑で、回転試験片22を固定試験片21に対して回転させた。固定試験片21の寸法は、19mm×19mm×厚さ3mmであり、リング状の回転試験片22の寸法は、外径45mm、厚さ6mm、幅6mmである。

回転条件は、押しつけ荷重を39.2Nとし、固定試験片21に対する回転試験片22の回転速度を周速度で2.6m/sとし、回転試験片22の回転距離を400mとした。この回転に伴う固定試験片21の摩耗体積を測定し、各サンプルに付いて、No.11の摩耗体積を1とした時の比を「摩耗比」として算出した。

これらの試験結果を表8に示す。

表 8

No.	ω 相粒子径	硬さ (Hv)	摩耗比	耐食性
1	1 μ m以下	492	0.72	○
2	1 μ m以下	514	0.64	○
3	1 μ m以下	520	0.68	○
4	1 μ m以下	510	0.72	○
5	1 μ m以下	493	0.69	○
6	1 μ m以下	491	0.65	○
7	1 μ m以下	530	0.61	○
8	1 μ m以下	528	0.60	○
9	1 μ m以下	501	0.72	○
10	1 μ m以下	492	0.68	○
11	ω 相無し	453	1.0	○
12	1 μ m超	430	1.4	○
13	10nm以下	480	0.88	○
14	—	690	0.1	×
15	—	421	2.3	○

表 8 の試験結果からわかるように、本発明の実施例に相当する N o . 1 ~ 1 0 , 1 3 では、粒径が $1 \mu\text{m}$ 以下の ω 相を有する結晶組織のチタン合金を用いることによって、 ω 相を有さない結晶組織のチタン合金を用いた場合 (N o . 1 1)、 ω 相の粒径が $1 \mu\text{m}$ を超える場合 (N o . 1 2)、および B e - C u 合金を用いた場合 (N o . 1 5) よりも硬くて耐摩耗性に優れ、耐食性も良好となる。なお、ステンレス鋼を用いた場合 (N o . 1 4) は、硬さおよび耐摩耗性は良好であったが、塩水での耐食性に劣っていた。

N o . 5 では、時効処理の温度が 475°C と ω 相析出温度より高いが、炉内で徐冷することにより時効処理後の冷却速度を遅くしているため、冷却中の $300 \sim 450^{\circ}\text{C}$ の温度域で ω 相が析出し、($\beta + \omega + \alpha$) 相になったと考えられる。

N o . 7 および 8 では、冷間圧延によって多量の塑性歪みがチタン合金に導入されるため、徐冷時に ω 相の核が多数位置に発生し、冷間圧延をしない場合 (N o . 5) と比較してチタン合金中の ω 相存在率 (体積比) が大きくなる。これにより、より硬さが硬く、耐摩耗性も特に良好であった。

N o . 1 3 は、 ω 相の粒径が 10 nm 以下と比較的小さかったため、N o . 1 ~ 1 0 より硬さおよび耐摩耗性が少し劣るものであったが、転がり軸受の軌道輪や転動体として使用できる範囲内であった。

以上のことから、内輪 (軌道部材) 2、外輪 (軌道部材) 1、転動体 3、保持器 4 からなる転がり軸受において、内輪 2 および外輪 1 を N o . 1 ~ 1 0 , 1 3 の試験片と同様にして作製することにより、粒子径 $1 \mu\text{m}$ 以下の ω 相を有する結晶組織のチタン合金からなる内輪 2 および外輪 1 が得られる。そして、この内輪 2 および外輪 1 と、例えば Si_3N_4 等のセラミックス製の転動体 3 と、必要に応じてプラスチック製の保持器 4 を組み合わせることにより、腐食性環境下や非磁性が要求される環境下での用途に好適な転がり軸受が得られる。

図 1 2 は、本発明の他の実施形態である深溝玉軸受 (軸受型番: 608) の断面図である。同図において、外輪 1 及び内輪 2 は、 $\text{Ti}-6\text{Al}-4\text{V}$ 等の $\alpha + \beta$ 型チタン合金または $\text{Ti}-15\text{Mo}-5\text{Zr}-3\text{Al}$ 、 $\text{Ti}-15\text{Mo}-5\text{Zr}-3\text{Al}$ 等の $\alpha + \beta$ 型チタン合金から形成されている。外輪 1 と内輪 2 との間に配設された転動体 3 は、窒化珪素、炭化珪素、ジルコニア、アルミナ等のセラ

ミックスから形成されている。転動体 3 が転動する軌道輪 1, 2 の軌道面には、硬質膜 6 が形成されている。この硬質膜 6 は TiN、CrN、TiAlN、ダイヤモンドライクカーボン等からなり、硬質膜 6 の表面には二硫化モリブデン、二硫化タングステン、官能基を有する含フッ素重合体等からなる潤滑性膜 7 が形成

5 されている。

前記チタン合金は、ビッカース硬さ Hv 350 以上の硬さを得るために、所定の形状に切削加工された後、第 1 または第 2 の方法により硬化処理が施されている。

第 1 の方法はチタン合金に溶体化処理及び時効処理を施して Hv 350 以上の

10 硬さを得る方法であり、第 2 の方法はチタン合金にガス窒化処理を施して Hv 350 以上の硬さを得る方法である。

第 1 の方法において、チタン合金が Ti-6Al-4V である場合は、チタン合金を 950~1000℃の温度雰囲気中に約 1 時間置き、その後、チタン合金を水冷して溶体化処理を行う。また、チタン合金が Ti-15Mo-5Zr-3

15 Al または Ti-15Mo-5Zr-3Al である場合は、チタン合金を 800~850℃の温度雰囲気中に約 1 時間置き、その後、チタン合金を水冷して溶体化処理を行う。

チタン合金の β 相から硬度の高い α 相を析出させる場合には、溶体化処理を行った後、チタン合金を 350~500℃の温度雰囲気中に約 3~40 時間置き、

20 チタン合金を時効処理する。時効処理の時間を調整することによって、チタン合金の硬さが調整される。時効処理によるチタン合金の冷却は、通常、空冷によって行われるが、チタン合金の硬さをより硬くするためには、 β 相から α 相をより微細に析出させるために、チタン合金を炉内で徐冷するのが望ましい。

第 2 の方法で Hv 350 以上の硬さを得る場合には、チタン合金表面の酸化を防ぐために、チタン合金を真空状態の炉内で変態点より低い温度で加熱する。こ

25 のとき、炉内圧力が 0.133 Pa を上回ると炉内の残留酸素とチタンとが化学反応してチタン合金の表面に窒化処理を阻害する酸化物膜が生成される。従って、チタン合金を窒化処理して Hv 350 以上の硬さを得る場合には、図 13 に示すように、炉内圧力を 0.133 Pa 以下とする。

チタン合金の窒化処理温度が高いと、チタンと窒素との反応性が良好となる。これに伴いチタン合金内に侵入した窒素の拡散速度も速くなり、その結果として、窒素拡散層がチタン合金の表層部に形成されるが、窒化処理温度が変態点（ α 相から β 相へ変態する温度）以上であると結晶粒が急激に大きくなり、軌道綫の疲労強度に影響を及ぼす。従って、チタン合金を窒素ガスあるいは NH_3 等の処理ガスで窒化処理する場合には、窒化処理温度を変態点より $5\sim 200^\circ\text{C}$ 程度低い温度とする。

窒素ガスあるいは NH_3 等の処理ガスでチタン合金を窒化処理する場合、処理ガスの圧力が高過ぎるとチタン合金表面の窒化が急激に進行し、チタン合金の表面に形成される窒化層が粗くて脆いものとなる。それを避けるためには、炉内のガス圧は、 1333 Pa 以下にすることが望ましい。また、冷却時も酸化を防ぐために、所定のガス圧に保持したまま炉内で冷却することが望ましい。

次に、外輪1及び内輪2の軌道面に硬質膜6を形成する方法について説明する。

硬質膜6の形成は、アーク蒸着法を利用した被膜処理装置（図14参照）を用いて行った。具体的には、まず、回転軸47を有する回転テーブル42に試験軸受を載置した。次に、真空ポンプ46により真空槽41内を排気して圧力を $1\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 以下とした状態で、気体導入口44から Ar ガスを導入しながら1対の陰極43、43に対してDCバイアスの印加を行うことにより、 Ar によるイオンボンバードを行い、ワーク48（外輪1及び内輪2）のクリーニングを行った。

次に、ワーク48の温度を $400\sim 500^\circ\text{C}$ とし、Ti系の硬質膜6を設ける場合にはTi材を、Cr系の硬質膜6を設ける場合にはCr材を、それぞれターゲット49、50に取り付けた。そして、回転テーブル42を回転させながら、ターゲット49、50に $-200\sim -300\text{ V}$ 、 $80\sim 150\text{ A}$ のバイアスを印加した。

また、窒化物系の硬質膜6を設ける場合はプロセスガスとして窒素ガス、炭化物系の硬質膜6を設ける場合はプロセスガスとしてメタンガス（ CH_4 ）を、気体導入口45から導入して、回転テーブル42を回転させながら、ターゲット49、50に同様のDCバイアスを印加した。

このような操作により、外輪 1 の少なくとも内周面全体と内輪 2 の少なくとも外周面全体とに、硬質膜 6 を設けることができた。硬質膜 6 の膜厚は、処理時間により調整した。

- 5 ガス窒化処理を施したものについては、ガス窒化処理により表面に形成された窒素化合物層を仕上げ研磨により取り除き、窒素拡散層を表出させ表面硬さを Hv 550 以上とし、その上層に硬質膜 6 を形成した。

硬質膜 6 を形成する方法は、上記のような方法に限定されるものではなく、例えば、HCD イオンプレーティング法、スパッタリング法、プラズマ CVD 法等を採用してもよい。

- 10 次に、硬質膜の剥離寿命を評価した結果について説明する。使用した軸受は、上記と同様の方法によって製造したスラスト玉軸受（軸受型番：51305）である。

- 15 図 15 に示すように、スラスト寿命試験機の回転軸 51 に、外輪 1，内輪 2，転動体 3，保持器 4 を備えるスラスト玉軸受 52 を装着し、ハウジング 53 内に潤滑油を満たした状態で回転試験を負荷荷重：9800 N、回転速度：1000 rpm、保持器材質：黄銅、転動体材質：窒化珪素、潤滑剤：#68 タービン油（68 cSt / 40℃）の条件で行った。

外輪 1 及び内輪 2 の母材の表面硬さ Hv、硬質膜の種類、剥離寿命の結果を、それぞれ表 9 に示す。

表 9

	No.	母材硬化処理 の種類 ¹⁾	母材表面 硬さHv	硬質膜	剥離 寿命比
実施例	1	A	450	TiN	33
	2	A	500	TiN	52
	3	A	500	TiAlN	78
	4	A	500	SiC+DLC	45
	5	B	603	TiN	85
	6	B	889	TiN	83
	7	B	889	TiAlN	132
	8	B	889	SiC+DLC	111
	9	A	376	TiN	10.5
	10	A	376	TiAlN	13.2
	11	A	350	TiN	8.5
	12	A	350	TiAlN	10.1
比較例	3'	なし	290	TiN	1
	4'	A	290	TiAlN	1.8

1) A:溶体化処理+時効硬化処理 B:ガス窒化処理

表9の外輪1及び内輪2の母材は、 β 型チタン合金Ti-15Mo-5Zr-3Alである。また、剥離寿命の判定は、加速度ピックアップにより検出した振動レベルが、初期値の5倍に達した時点を寿命とした。そして、生材（硬化処理を施していない母材）にTiNからなる硬質膜を被覆したもの（表9のNo. 5 1'）の寿命を1とした比較値により示した。

母材の表面硬さHvと硬質膜の剥離寿命との関係を図16に示す。図16から分かるように、母材の表面硬さがHv350以上であると、硬質膜の剥離寿命が向上し、Hv450以上であると、より大きく向上した。

表9および図16からわかるように、本発明の実施例に相当するNo.1~12は、比較例であるNo.3'及びNo.4'に比較して硬質膜の剥離寿命比が高い値を示している。これは、No.3'及びNo.4'の軸受は硬質膜が形成される軌道面の表面硬さがHv290以下であるのに対し、No.1~12の軸受は硬質膜が形成される軌道面の表面硬さがHv350以上となっているためである。

表9に示すNo.1~4とNo.9~12とを比較すると、No.1~4の剥離寿命比はNo.9~12の剥離寿命比よりも高い数値を示していることがわかる。これは、No.9~12の軸受は軌道面の表面硬さがHv376以下であるのに対し、No.1~4の軸受は軌道面の表面硬さがHv450以上となっているためである。

したがって、硬質膜が形成される軌道面の表面硬さをHv350以上、好ましくはHv450以上とすることによって、硬質膜の耐久性を高めることができ、硬質膜の早期剥離等を防止できる。

次に、真空雰囲気での転がり軸受の耐久性を評価した結果について説明する。使用した軸受は、上記と同様の方法によって製造した深溝玉軸受（軸受型番：608、内径8mm×外径22mm×幅7mm）である。

25 真空耐久試験装置の真空チャンバ61内の軸受ハウジング62に、外輪1、内輪2、転動体3を備える深溝玉軸受10を装着して（図17参照）、真空環境下における耐久試験を行った。なお、モータ63の回転は、磁気シールユニット64を介して試験軸受10に導入されるようになっている。また、アキシアル荷重がコイルばね65により試験軸受10に負荷され、試験軸受10の回転トルクは

図示しないストレインゲージを貼り付けた板ばね 66 により測定されるようになっている。さらに、真空チャンバ 61 内の真空排気は、図示しないターボ分子ポンプやイオンポンプ等により行われる。

このときの試験条件は、下記の通りである。

- 5 アキシアル荷重 : 49 N
 回転速度 : 1000 rpm
 真空度 : 10^{-5} Pa 以下

- 10 外輪 1 及び内輪 2 の母材の種類、母材に施した硬化処理の種類、母材の表面硬さ H_v、硬質膜 6 の種類、潤滑性膜 7 の種類、転動体 3 の材質、寿命（真空耐久試験の結果）を、それぞれ表 10 に示す。なお、潤滑性膜の種類欄における「DFO」とは、官能基を有する含弗素重合体を意味する。また、寿命は、生材（硬化処理を施していない母材）に TiN からなる硬質膜を被覆したもの（表 10 の No. 3'）の寿命を 1 とした相対値により示した。

表10

	No.	母材の材質	硬化 処理 ¹⁾	母材表面 硬さHv	硬質膜 の種類	潤滑膜 の種類	転動体の 材質	寿命比
実施例	13	Ti-6Al-4V	B	554	TiN	DF0	窒化珪素	42
	14	Ti-15Mo-5Zr-3Al	A	450	TiN	DF0	窒化珪素	48
	15	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	CrN	DF0	窒化珪素	≥100
	16	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	TiAlN	DF0	窒化珪素	≥100
	17	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	DLC	DF0	窒化珪素	≥100
	18	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	TiN	DF0	ジルコニア	≥100
	19	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	TiN	DF0	炭化珪素	≥100
	20	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	TiN	DF0	アルミナ	≥100
	21	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	TiN	DF0	2)	≥100
	22	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	DLC	MoS ₂	窒化珪素	35
	23	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	DLC	WS ₂	窒化珪素	41
	24	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	DLC	なし	窒化珪素	22
	25	Ti-15Mo-5Zr	B	667	TiN	DF0	窒化珪素	≥100
	26	Ti-15Mo-5Zr	A	552	TiN	DF0	窒化珪素	≥100
	27	Ti-15Mo-5Zr-3Al	A	376	TiN	DF0	窒化珪素	33
	28	Ti-15Mo-5Zr-3Al	A	376	TiN	MoS ₂	窒化珪素	18
	29	Ti-15Mo-5Zr-3Al	A	376	TiN	WS ₂	窒化珪素	19
比較例	3'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	なし	290	TiN	DF0	窒化珪素	1
	4'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	B	603	なし	DF0	窒化珪素	7.6

1) A: 溶体化処理+時効硬化処理 B: ガス窒化処理

2) 窒化珪素+TiN膜

- 表10からわかるように、本発明の実施例に相当するNo.13～29は、比較例であるNo.3'に比較して真空中での寿命比が高い値を示している。これは、No.3'の軸受は軌道面の表面硬さがHv290以下であるのに対し、No.13～29の軸受は軌道面の表面硬さがHv350以上となっているためである。また、本発明の実施例に相当するNo.13～29は、比較例であるNo.4'に比較して真空中での寿命比が高い値を示している。これは、No.4'の軸受は潤滑膜がチタン合金製軌道輪の軌道面上に直接形成されているのに対し、No.13～29の軸受は潤滑膜が軌道面上に形成された硬質膜の表面に形成されているためである。
- 10 したがって、チタン合金製軌道輪の軌道面上に硬質膜を形成し、この硬質膜の表面に潤滑膜を形成することによって、グリース等の潤滑剤が使用できない真空雰囲気でも長期にわたって良好に使用できる転がり軸受を得られることがわかる。
- 母材としては、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金であるTi-6Al-4Vと、 β 型チタン合金であるTi-15Mo-5Zr-3Al及びTi-15Mo-5Zrとを用いているが、母材の表面硬さをHv350以上、好ましくはHv450以上にできるのであれば、チタン合金の種類は前記のものに限定されず、他の種類のチタン合金も使用可能である。
- 15

チタン合金製軌道輪の溶体化処理条件と時効処理条件を表11に示す。

表11

記号	軌動輪材質	溶体化処理条件	時効処理条件
A	Ti-15Mo-5Zr-3Al	730~850°C × 1Hr	450°C × 20Hr
B	↑	800~850°C × 1Hr	450°C × 20Hr 475°C × 10Hr
C	Ti-15Mo-5Zr	730~850°C × 2Hr	400°C × 90Hr
D	↑	730~850°C × 2Hr	450°C × 20Hr
E	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	730~850°C × 3Hr	450°C × 20Hr
F	Ti-22V-4Al	730~850°C × 4Hr	450°C × 20Hr
G	Ti-6Al-4V	900°C × 1Hr	540°C × 10Hr

[真空回転試験]

表 1 1 に示されるチタン合金製軌道輪と表 1 2 に示す材料からなる転動体とを用いて試験軸受を作製し、各試験軸受に対して真空下での耐摩耗性試験を行った。具体的には、各試験軸受に対して真空下で回転試験をアキシャル荷重：19.6
5 N、回転速度：1000 rpm、潤滑：無潤滑の条件で行い、 1×10^7 回転した後の各軌道輪の摩耗量を、No.1'の摩耗量を1とした時の比を「摩耗比」として算出した。

真空回転試験の試験結果を表 1 2 に示す。

表12

	No.	内・外輪	転動体材質	熱伝導率 (W/m·K)	軌動輪 摩耗比
実施例	1	B	WC-6%Co	62	0.42
	2	B	WC-6%TiC-13%TaC-6%Co	50	0.45
	3	B	TiC-20%TiN-15%WC-10%Mo ₂ C-5%Ni	35	0.52
	4	B	TiC-25%TiN-15%WC-5%Mo ₂ C-15%Ni	51	0.42
	5	B	WC-6%TiC-13%TaC-6%Co	43	0.48
	6	A	WC-6%TiC-13%TaC-6%Co	50	0.47
	7	C	WC-6%TiC-13%TaC-6%Co	50	0.44
	8	D	TiC-20%TiN-15%WC-10%Mo ₂ C-5%Ni	35	0.62
	9	E	TiC-20%TiN-15%WC-10%Mo ₂ C-5%Ni	35	0.63
	10	F	WC-6%TiC-13%TaC-6%Co	43	0.54
	11	G	WC-6%TiC-13%TaC-6%Co	43	0.51
比較例	1'	C	Si ₃ N ₄	31	1.00
	2'	C	WC-2%TaC-15%Co	32	0.91
	3'	C	TiC-20%TiN-15%WC-12%Mo ₂ C-15%Ni	29	0.82

表 1 2 に示す各軌道輪の摩耗比は、N o . 1 ' の摩耗量を 1 として評価した場合の比較値である。

表 1 2 の試験結果からわかるように、本発明の実施例に相当する N o . 1 ~ 1 2 は、比較例である N o . 1 ' に比較して寿命比が高い値を示している。これは、
5 N o . 1 ' の転がり軸受は転動体の材質が S i N₄ であるのに対し、N o . 1 ~ 1 2 の転がり軸受は転動体の材質が超硬合金またはサーメットとなっているためである。

また、N o . 1 ~ 1 2 の軸受は、比較例である N o . 2 ' 及び N o . 3 ' に比較して寿命比が高い値を示している。これは、N o . 2 ' 及び N o . 3 ' の軸受は超硬合金またはサーメットの熱伝導率が 3 1 W / (m · K) 以下であるのに対し、N o . 1
10 ~ 1 2 の転がり軸受は超硬合金またはサーメットの熱伝導率が 3 5 W / (m · K) 以上となっているためである。

したがって、転動体を超硬合金またはサーメットから形成し、かつ超硬合金またはサーメットの熱伝導率が 3 5 W / (m · K) 以上とすることにより、真空雰
15 囲気でも長期にわたって良好に使用できる転がり軸受を得られることがわかる。

表 1 2 に示した摩耗比と超硬合金またはサーメットの熱伝導率との関係を図 1 8 に示す。同図に示すように、超硬合金またはサーメットの熱伝導率が 5 0 W / (m · K) に達するまでは熱伝導率が高いほどチタン合金製軌道輪の摩耗比が上昇するが、超硬合金またはサーメットの熱伝導率が 5 0 W / (m · K) を超えると熱伝導率が高くなってもチタン製軌道輪の摩耗比はそれほど上昇しない。
20

このことから、転動体を超硬合金またはサーメットから形成する場合には、超硬合金またはサーメットの熱伝導率を 3 0 ~ 5 0 W / (m · K) の範囲内とすることが望ましい。

表 1 3 に示す材料で試験用の転がり軸受を作製し、作製した各試験軸受に対して、次のような塩水転がり試験と磁束密度変化測定試験を実施した。なお、表 1
25 3 の軌道輪材質 A、B、C、G は表 1 1 に示した材料であり、また転動体材質 N R 8 は W C - N i 系超硬合金、N R 1 1 は W C - N i - C r 系超硬合金、D U X 3 0 は T i C - T a N - N i - M o 系サーメットである。

表13

	No.	軌動輪 材質	転動体材質	転動体 熱伝導率 (W/m·K)	塩水転がり試験		磁束密度 変化
					軌動輪 摩擦比	錆の発生	
実施例	12	A	超硬合金NR8	75	0.38	無し	無し
	13	B	↑	↑	0.35	無し	無し
	14	C	↑	↑	0.31	無し	無し
	15	D	↑	↑	0.35	無し	無し
	16	G	↑	↑	0.41	無し	無し
	17	A	超硬合金NR11	63	0.40	無し	無し
	18	B	↑	↑	0.36	無し	無し
	19	C	↑	↑	0.31	無し	無し
	20	D	↑	↑	0.38	無し	無し
	21	G	↑	↑	0.44	無し	無し
	22	A	サーメットDUX30	35	0.50	無し	無し
	23	B	↑	↑	0.43	無し	無し
	24	C	↑	↑	0.49	無し	無し
	25	D	↑	↑	0.45	無し	無し
	26	G	↑	↑	0.61	無し	無し
比較例	4'	B	Si ₃ N ₄	31	1.0	無し	無し

[塩水転がり試験]

図2に示す試験装置を用い、各試験軸受に対して5重量%濃度のNaCl水溶液中での転がり寿命試験を行い、各軌道輪の摩耗比と錆発生の有無を調べた。このときの試験条件は以下の通りである。

- 5 ラジアル荷重：49.2N
 アキシアル荷重：19.2N
 回転速度：1000rpm
 潤滑：無潤滑

[磁束密度変化測定試験]

- 10 図5に示されるように、永久磁石16の磁界中に配置された回転軸13に試験軸受10を取り付けた後、回転軸13を約500rpmの速度で回転させ、そのときの磁束密度の変化をテスラメータ17で測定した。そして、図6に示すテスラメータの出力が最大で0.1mT以上になったものを磁束密度の変化がありとし、0.1mT未満のものを磁束密度の変化が無しとした。
- 15 これらの試験結果を表13に示す。同表の試験結果からわかるように、本発明の実施例に相当するNo.1～26では、塩水による腐食性環境下でも、優れた耐摩耗性を示し、勿論、錆の発生は認められなかった。また、磁束密度の変化も全くないことから、非磁性にも優れていることが確認された。

- 20 超硬合金やサーメットは、セラミックスに相当する高硬度(Hv900以上)であり、且つ高融点であるため、潤滑条件が厳しくても、凝着や摩耗が生じにくい。また、高硬度であるために、加工時の塑性変形量が非常に小さく、微小な凹凸が生じにくい。このため、極めて高い精度の転動体を製造し得る。また、靱性については、セラミックスより高いので、製造時に割れや欠けが生じにくく、衝撃荷重に対しても破損しにくい。

- 25 転動体材料として熱伝導率が35W/(m・K)以上の超硬合金やサーメットを用いることで、軌道輪と転動体との接触面での発熱量が抑えられ、チタン合金製軌道輪の凝着摩耗を抑制することができる。また、超硬合金やサーメットはセラミックスに比較してヤング率が大いなので、転動体と軌道輪との接触面積が小さくなり、回転トルクを抑制して回転特性を安定させることができる。

超硬合金及びサーメットは、周期律表で第 IVa 族、第 V a 族、第 VI a 族に属する 9 種類の金属、即ち W、Mo、Cr、Ta、Nb、V、Hf、Zr、Ti の炭化物を対象とし、これら炭化物粉末を Fe、Co、Ni 等の鉄族金属を用いて焼結結合した合金である。サーメットは、このうち、主に TiC、TiN、或いは TiCN を Ni で結合した焼結合金である。

超硬合金を、合金系で分類すると、WC-Co 系、WC-Cr₃C₂-Co 系、WC-TaC-Co 系、WC-TiC-Co 系、WC-NbC-Co 系、WC-TaC-NbC-Co 系、WC-TiC-TaC-NbC-Co 系、WC-TiC-TaC-Co 系、WC-ZrC-Co 系、WC-TiC-ZrC-Co 系、WC-TaC-V₂C-Co 系、WC-Cr₃C₂-Co 系、WC-TiC-Cr₃C₂-Co 系等がある。また、耐食性を向上させたものには、WC-Ni 系、WC-Co-Ni 系、WC-Cr₃C₂-Mo₂C-Ni 系、WC-Ti(C, N)-TaC 系、WC-Ti(C, N) 系、Cr₃C₂-Ni 系等がある。

WC-Co 系の代表的な組成は、W : Co : C = 70.41 ~ 91.06 : 3.0 ~ 25.0 : 4.59 ~ 5.94 である。WC-TaC-NbC-Co 系の代表的な組成は、W : Co : Ta : Nb : C = 65.7 ~ 86.3 : 5.8 ~ 25.0 : 1.4 ~ 3.1 : 0.3 ~ 1.5 : 4.7 ~ 5.8 である。WC-TiC-TaC-NbC-Co 系の代表的な組成は、W : Co : Ta : Ti : Nb : C = 65.0 ~ 75.3 : 6.0 ~ 10.7 : 5.2 ~ 7.2 : 3.2 ~ 11.0 : 1.6 ~ 2.4 : 6.2 ~ 7.6 である。WC-TaC-Co 系の代表的な組成は、W : Co : Ta : C = 53.51 ~ 90.30 : 3.5 ~ 25.0 : 0.30 ~ 25.33 : 4.59 ~ 5.90 である。WC-TiC-Co 系の代表的な組成は、W : Co : Ti : C = 57.27 ~ 78.86 : 4.0 ~ 13.0 : 3.20 ~ 25.59 : 5.88 ~ 10.14 である。WC-TiC-TaC-Co 系の代表的な組成は、W : Co : Ta : Ti : C = 47.38 ~ 87.31 : 3.0 ~ 10.0 : 0.94 ~ 9.38 : 0.12 ~ 25.59 : 5.96 ~ 10.15 である。

サーメットは、TiC-Ni 系、TiC-Mo-Ni 系、TiC-Co 系、TiC-Mo₂C-Ni 系、TiC-Mo₂C-ZrC-Ni 系、TiC-Mo₂C

-Co系、 Mo_2C -Ni系、 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{Mo}_2\text{C}$ -Ni系、 $\text{TiC}-\text{TiN}-\text{Mo}_2\text{C}$ -Ni系、 $\text{TiC}-\text{TiN}-\text{Mo}_2\text{C}-\text{Co}$ 系、 $\text{TiC}-\text{TiN}-\text{Mo}_2\text{C}-\text{TaC}$ -Ni系、 $\text{TiC}-\text{TiN}-\text{Mo}_2\text{C}-\text{WC}-\text{TaC}$ -Ni系、 $\text{TiC}-\text{WC}$ -Ni系、 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{WC}$ -Ni系、 $\text{TiC}-\text{Mo}$ 系、
5 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{Mo}$ 系等がある。ここで、 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{Mo}_2\text{C}$ -Ni系、 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{WC}$ -Ni系、或いは $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{Mo}$ 系は、 $\text{TiC}-\text{Mo}_2\text{C}$ -Ni系、 $\text{TiC}-\text{WC}$ -Ni系、或いは $\text{TiC}-\text{Mo}$ 系を窒素ガス(N_2)中で焼結した合金である。

サーメットの代表的な組成は、 $\text{TiC}-30\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-10\%\text{Mo}-30\%\text{Ni}$ 、
10 $\text{TiC}-20\%\text{Mo}-30\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-30\%\text{Mo}-30\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-11\%\text{Mo}_2\text{C}-24\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-30\%\text{Mo}_2\text{C}-20\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-19\%\text{Mo}_2\text{C}-24\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-8\%\text{Mo}_2\text{C}-15\%\text{Ni}$ 、 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-25\%\text{Mo}_2\text{C}-15\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-14\%\text{TiN}-19\%\text{Mo}_2\text{C}-24\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}-11\%\text{Mo}_2\text{C}-24\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}-19\%\text{Mo}_2\text{C}-24\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}-27\%\text{Mo}_2\text{C}-24\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-20\%\text{Mo}-15\%\text{Ni}$ 、 $\text{TiC}-30\%\text{Mo}-15\%\text{Ni}$ 等である。

なお、転動体の超硬合金やサーメットの成分系を変えることによって、高耐食性、非磁性に対応することができる。また、本発明の転がり軸受を高速回転用として使用する場合には、転動体材料として、密度が小さいサーメットを用いるのが望ましい。また、本発明の転がり軸受に高負荷が負荷される場合や衝撃荷重が付与される場合には、転動体材料として、より高靱性な超硬合金を使用するのが望ましい。

表14に示される材料で試験用の転がり軸受(内径:12mm、外径:28mm、幅:8mm、玉径:4.76mm、玉数:8)を作製し、作製した各試験軸
25 受に対して、次のような耐衝撃性試験と転がり寿命試験を行った。

表14

	No.	内輪および外輪		転動体			耐衝撃性 評価値	耐食性 評価値
		材 料	表面硬さ	材 料	表面硬化処理	表面硬さ		
実施例	1	Ti-6Al-4V	425~430	SUJ2	クロマイジング	1050~1100	1.6	2.7
	2	Ti-6Al-4V	425~430	13%CrSUS	Nv窒化	1230~1350	1.7	3.0
	3	Ti-15Mo-5Zr-3Al	475~480	SUJ2	クロマイジング	1050~1100	1.6	3.1
	4	Ti-15Mo-5Zr-3Al	475~480	13%CrSUS	Nv窒化	1230~1350	1.8	3.6
	5	Ti-15Mo-5Zr	550~555	SUJ2	クロマイジング	1050~1100	1.7	2.9
	6	Ti-15Mo-5Zr	550~555	13%CrSUS	Nv窒化	1230~1350	1.7	3.5
比較例	1'	SUS440C	670~675	Si ₃ N ₄	—	1450~1570	1.0	1.0
	2'	SUS440C	670~675	SUJ2	クロマイジング	1050~1100	1.0	1.0
	3'	SUS440C	670~675	13%CrSUS	Nv窒化	1230~1350	1.2	1.1
	4'	Ti-6Al-4V	425~430	Si ₃ N ₄	—	1450~1570	1.2	2.3
	5'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	475~480	Si ₃ N ₄	—	1450~1570	1.3	2.6
	6'	Ti-15Mo-5Zr	550~555	Si ₃ N ₄	—	1450~1570	1.2	2.5
	7'	Ti-6Al-4V	425~430	SUJ2	無し	730~740	1.4	0.4
	8'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	475~480	13%CrSUS	無し	720~730	1.6	1.3
	9'	Ti-15Mo-5Zr	550~555	13%CrSUS	無し	720~730	1.5	1.2

表14の内輪及び外輪は下記の(i)～(iv)のいずれかの方法で得られたものである。

(i) 5 5 先ず、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金であるTi-6Al-4Vからなる素材を、所定形状に切削加工した後、950～1000℃で1時間保持する溶体化処理を行い、水冷した。次に、450℃で20時間保持した後、200℃以下になるまで炉内に放置する時効処理を行った。次に、仕上げの研削加工を行った。これにより、 β 相からなるマトリックスに微細な α 相が分散している結晶組織のチタン合金からなり、表面硬さがHv425～430である内輪および外輪を得た。

10 (ii) 先ず、 β 型チタン合金であるTi-15Mo-5Zr-3Alからなる素材を、所定形状に切削加工した後、800～850℃で1時間保持する溶体化処理を行い、水冷した。次に、425℃で17時間保持した後、さらに475℃で7時間保持した後、200℃以下になるまで炉内に放置する時効処理を行った。次に、仕上げの研削加工を行った。これにより、 β 相からなるマトリックスに

15 (i) の場合よりも微細な α 相が分散している結晶組織のチタン合金からなり、表面硬さがHv475～480である内輪および外輪を得た。

(iii) Ti-15Mo-5Zrからなる素材を所定形状に切削加工した後、800～850℃で1時間保持する溶体化処理を行い、水冷した。次に、450℃で20時間保持した後、200℃以下になるまで炉内に放置する時効処理を行った。次に、仕上げの研削加工を行った。これにより、 β 相からなるマトリックスに

20 (i) の場合よりも微細な α 相が分散している結晶組織のチタン合金からなり、表面硬さがHv550～550である内輪および外輪を得た。

(iv) 25 先ず、SUS440Cからなる素材を所定形状に切削加工した。次に、保持温度1000～1050℃、油温度60℃の条件で油焼入れを行った後、150～200℃、2時間の条件で焼き戻しを行った。次に、仕上げの研削加工を行った。これにより、SUS440Cからなり表面硬さがHv670～675である内輪および外輪を得た。

また、転動体は下記の(v)～(ix)のいずれかの方法で得られたもので、真球度がJIS等級G3以上、表面粗さがRaで0.003 μ m以下、径相互差が0.05 μ m以下となるように作製したものである。

(v) 先ず、S U J 2 (高炭素クロム軸受鋼2種) からなる素材を所定形状に切削加工した後、前述のクロム拡散浸透処理 (表14には「クロマイジング」と表記) を980~1050℃、10時間の条件で行った。次に、保持温度830~850℃、油温度60℃の条件で油焼入れを行った後、150~200℃、2
5 時間の条件で焼き戻しを行った。次に、仕上げの研削加工を行った。これにより、表面に10~15 μm (玉の直径の2~3%に相当する寸法) の深さでクロム拡散層が形成され、表面硬さがHv1050~1100である玉を得た。

(vi) 先ず、13%Crステンレス鋼 (S U S) からなる素材を所定形状に切削加工した。次に、保持温度1000~1050℃、油温度60℃の条件で油焼
10 入れを行った後、150~200℃、2時間の条件で焼き戻しを行った。次に、前述のNv窒化処理 (表14には「Nv窒化」と表記) を410~460℃、24~48時間の条件で行った。次に、仕上げの研削加工を行った。これにより、表面に10~15 μm (玉の直径の2~3%に相当する寸法) の深さで窒化層が形成され、表面硬さがHv1230~1350である玉を得た。

15 (vii) 窒化珪素 (S i₃ N₄) からなる素材を所定形状に切削加工した後、仕上げの研削加工を行った。これにより、表面硬さがHv1450~1570である玉を得た。

(viii) 先ず、S U J 2 からなる素材を所定形状に切削加工した。次に、保持温度830~850℃、油温度60℃の条件で油焼入れを行った後、150~20
20 0℃、2時間の条件で焼き戻しを行った。次に、仕上げの研削加工を行った。これにより、S U J 2 からなり表面硬さがHv730~740である玉を得た。

(ix) 13%Crステンレス鋼からなる素材を所定形状に切削加工した。次に、保持温度1000~1050℃、油温度60℃の条件で油焼入れを行った後、1
50~200℃、2時間の条件で焼き戻しを行った。次に、仕上げの研削加工を行
25 った。これにより、13%Crステンレス鋼からなり、表面硬さがHv720~730である玉を得た。

[耐衝撃性試験]

耐衝撃性試験は、次の方法で行った。先ず、各試験軸受を衝撃加速度測定機の回転軸に取り付けた。次に、転がり軸受を取付け、19.6Nの予圧をかけた状

態でアキシャル方向に種々の高さ（30～100 cm）から試験軸受を落下させて、落下時の衝撃加速度を加速度計で測定した。また、この落下を行う前と行った後に、試験軸受を回転させてアキシャル振動加速度（G値）を測定した。

- この測定の後、落下後のG値と落下前のG値との差が5 mG以上となった最小の落下高さを調べ、その落下高さでの衝撃加速度により耐衝撃性を判定した。表14の耐衝撃性評価値は、No. 1'の試験結果（落下前後のG値の差が5 mG以上となった最小の落下高さでの衝撃加速度）を1として評価した場合の比較値である。

〔転がり寿命試験〕

- 10 試験軸受を下記の条件で回転させながら、転がり軸受に5重量%濃度のNaCl水溶液を1分毎に1ミリリットルの条件で噴霧した。この回転は、アキシャル振動加速度（G値）を常時測定しながら行い、G値が初期値の5倍に達するまでの時間を耐食性転がり寿命とした。表14の耐食性評価値は、No. 1'の試験結果（G値が初期値の5倍に達するまでの時間）を1として評価した場合の比較値である。

15 <回転条件>

ラジアル荷重：78 N

アキシャル荷重：20 N

回転速度：1000 rpm

これらの結果を表14に併せて示す。

- 20 表14の各試験結果からわかるように、本発明の実施例に相当するNo. 1～6では、比較例であるNo. 1'～9'に比較して耐衝撃性および耐食性のいずれものが高い値を示した。

- 25 チタン合金としては、 β 型（near β 型も含む）または（ $\alpha + \beta$ ）型のものを用いることが好ましい。これらのチタン合金は、 α / β 変態点直下あるいは直上の温度から溶体化処理を行って β 相とした後、350～600℃で時効処理することにより、 β 相中に微細な α 相を析出させる析出硬化によって、硬さをHV400以上とすることができる。

転動体としては、次の（a）または（b）の構成が好ましい。

（a）高炭素クロム軸受鋼で形成された後に、表面硬化処理としてクロム拡散

浸透処理が施されて、耐食性の表面硬化層としてクロム拡散層を有する。

(b) クロムを3.0重量%以上（好ましくは8.0重量%以上）有する鉄鋼材料で形成された後に、表面硬化処理として窒化処理が施されて、耐食性の表面硬化層として緻密で均一な窒化層を有する。

- 5 (a) のクロム拡散浸透処理は例えば次のようにして行う。まず、高炭素クロム軸受鋼からなる被処理物と、粉末状のクロム (Cr)、粉末状のアルミナ (Al_2O_3)、粉末状の塩化アンモニウム (NH_4Cl) が調合された薬剤とを、鋼製のケースに入れて密閉し、このケースを炉内に入れる。次に、ケース内に水素 (H_2) ガスあるいはアルゴン (Ar) を通しながら、炉内を900～1100℃に加熱して所定時間保持する。

- 10 これにより、ケース内で薬剤が反応して塩化クロム (CrCl_2) の蒸気が生じる。この塩化クロムが被処理物表面をなす原子と置換反応して、被処理物表面にクロムが拡散浸透する。あるいは、塩化クロムが水素で還元されて析出したクロムが、被処理物表面に拡散浸透する。その結果、被処理物表面にクロム拡散層が形成される。このクロム拡散層は、耐食性を有し、表面硬さはHv1050～1100となる。

なお、クロム拡散浸透処理後に徐冷を行うと芯部の硬さは低下するため、この処理後に焼入れおよび焼き戻しを行って芯部を硬くすることが好ましい。

- 20 (b) の窒化処理は例えば次のようにして行う。まず、クロムを3.0重量%以上（好ましくは8.0重量%以上）有する鉄鋼材料からなる被処理物に対して、例えばフッ化窒素 (NF_3) ガスを用いて、200～400℃でフッ化処理を行う。次に、アンモニア (NH_3) ガスを用いて、400～500℃で窒化処理を行う。この方法は、Nv窒化処理（エアウォーター（株）の登録商標）と称されている。

- 25 この方法では、前処理としてフッ化処理を行うことにより、窒化処理を400～500℃という低温で行っても、非常に緻密で均一な窒化層が形成できる。この窒化層は、耐食性を有し、表面硬さはHv1230～1350となる。また、低温で窒化処理を行うことにより、被処理物の表面に微細な変形が生じることを防止できる。そのため、表面硬化処理によって転動体の寸法精度が劣化すること

が防止される。

5 なお、クロムを3.0重量%以上（好ましくは8.0重量%以上）有する鉄鋼材料を使用する理由は、表面硬化層の硬さを、良好な耐摩耗性を得るために必要な硬さとするためである。すなわち、(b)の表面硬化層の硬さは、クロムと窒素が微細なクロム窒化物を形成することによって向上するが、クロムの含有率が3.0重量%未満であると、良好な耐摩耗性を得るために必要な硬さが得られない。

10 また、N_v窒化処理によって粗大な共晶炭化物が生じないようにするために、「 $[C(\%)] \leq -0.05[Cr(\%)] + 1.41$ 」を満たす鉄鋼材料を使用することが好ましい。

 (a) および (b) の表面硬化層の厚さ（深さ）は、転動体直径の1.5～6%に相当する寸法であって、100 μ m以下にすることが好ましい。

15 (a) および (b) の処理によって形成された表面硬化層のヤング率は、被処理物であるステンレス鋼や軸受鋼のヤング率（200～210GPa）とほぼ同じであって、セラミックスのヤング率250～400GPaよりも低い。

20 本発明の転がり軸受では、特開平11-223221号公報に記載の転がり軸受と比較して、転動体と軌道輪との接触面積が大きくなって、接触面圧が小さくなる。そのため、回転時に転動体と軌道輪との間に生じる剪断応力が緩和されて、転がり疲労が生じ難くなる。また、外部から衝撃荷重がかかった時に、転動体および軌道輪に微小な圧痕が生じ難くなる。

 本発明の他の実施形態に係る転がり軸受を図19に示す。同図に示すように、本実施形態の転がり軸受は、チタン合金からなる軌道輪1, 2と、軌道輪1, 2間に介挿された転動体3と、軌道輪1, 2間に封入されたグリースの漏出あるいは異物侵入等を防止するためのシール5とを備えている。

25 軌道輪1, 2の素材としては、ヤング率に対する硬さの比(H/E)が3.7以上のチタン合金が使用され、 $3.7 \leq (H/E)$ を満たすチタン合金であればチタン合金の種類を問わず好適に使用し得る。但し、好ましくは、溶体化処理および時効処理による析出硬化によって、高い硬度が得られる $\alpha + \beta$ 型あるいは β 型（near β 型も含む）チタン合金を使用するのがよい。例えば、 $\alpha + \beta$ 型チ

タン合金Ti-6Al-4V、あるいはβ型チタン合金Ti-22V-4Al、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al、Ti-15Mo-5Zr-3Alなどである。

- 5 ここで、例えば、溶体化処理でβ相にし、時効処理によって柔らかいβ相にα相を析出して、少なくとも表面から2～5%D_a（D_a；転動体直径）までの深さの硬さをH_v420以上に設定でき、もって（H/E）を3.7以上にすることが実現される。

また、転動体である転動体3は、鉄鋼材料製あるいはセラミックス製の転動体を使用し得る。

- 10 ただし、耐食性が求められる場合には、転動体3として、ステンレス製あるいはセラミックス製の転動体を使用することが好ましい。特に軽量化が求められる場合には、窒化珪素系、炭化珪素系、酸化アルミニウム系あるいは酸化ジルコニウム系などのセラミックス製の転動体を使用することが好ましい。また、激しい衝撃が負荷される場合には、セラミックスよりも靱性に優れヤング率が低い、S
- 15 UJ2などの高炭素クロム鋼、SUS440C、13Cr系などのマルテンサイト系ステンレス鋼あるいは、M50に代表される高速度鋼などから構成される鉄鋼材料製の転動体を使用することが好ましい。

また、封入されるグリースは、使用可能な温度範囲のものであれば、特に限定はなく、使用し得る。

- 20 また、上記シール5は、使用可能な温度範囲のものであれば、材質には特に限定はなく使用し得るが、好ましくは、軌道輪1、2の弾性変形にともない弾性変形しやすいニトリルゴムなどのゴム製シールを使用する。

次に、上記構成の転がり軸受の作用などについて説明する。

- 25 上記軌道輪1、2は、チタン合金製の軌道輪であるので、ヤング率が低く、弾性変形しやすい。このため、車輪などから軸受に衝撃が伝達した場合には、軌道輪が局部的に弾性変形をし、衝撃を吸収するばねのような役割を果たすため、機器本体に伝達する衝撃は少なくなる。よって、車椅子などの介護支援器具、ローラーブレイドなどのスポーツ器具、あるいは自転車などのように、車輪からの衝撃あるいは振動が、直接機器本体あるいは使用者に伝達するような用途では、本

発明に係る転がり軸受を使用することによって、衝撃あるいは振動が緩和されるため、好適に使用し得る。

- さらに、チタン合金とすると共に、ヤング率に対する硬さの比 (H/E) を 3.7 以上に設定していることから、耐圧痕性及び転がり寿命が向上する。このため、
- 5 軸受に衝撃や振動が負荷される場合、あるいは、異物が軸受内に混入するおそれがある場合でも、好適に使用し得る。

さらにまた、潤滑剤として、グリースを使用することで、当該グリースが振動・衝撃に対しダンパーとして作用することから、さらに衝撃及び振動の緩和、及び耐圧痕性が向上する。

- 10 上記実施形態では、転がり軸受として玉軸受を例示しているが、ころ軸受などであっても構わない。

以下に示す方法で、本発明に係る転がり軸受を製作した。なお、潤滑剤としてグリースを封入した。

- 軌動輪には、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金 ($Ti-6Al-4V$) または β 型チタン合
- 15 金 ($Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al$ 、 $Ti-22V-4Al$ 、 $Ti-15Mo-5Zr-3Al$ 等) のいずれかを用いて、軸受型番 6001 の転がり軸受の軌道輪を製作した。旋削加工後に、溶体化処理および時効処理を施し、その後研削加工をした。

- 溶体化処理は、次の方法で行った。すなわち、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金 $Ti-6Al$
- 20 $1-4V$ については、 $950 \sim 1000^{\circ}C$ の温度で 1 時間保持した後、水冷することによって溶体化処理を行った。また、 β 型チタン合金 $Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al$ 、 $Ti-22V-4Al$ および $Ti-15Mo-5Zr-3Al$ については、 $750 \sim 850^{\circ}C$ の温度で 1 時間保持した後、水冷することによって溶体化処理を行った。

- 25 時効処理に関しては、 $400^{\circ}C \sim 600^{\circ}C$ の温度で 6 ～ 30 時間保持した後、 $200^{\circ}C$ 以下になるまで炉内冷却を施して時効処理を行った。

転動体には、窒化珪素系、炭化珪素系、酸化ジルコニウム系および酸化アルミニウム系からなるセラミックス製の転動体および 13% Cr 系のマルテンサイトステンレス鋼製の転動体を使用した。

グリースは、鉱油系グリースを使用した。また、シール 5 はニトリルゴム製シールを使用し、保持器はポリアミド製保持器を使用した。

- また、比較例として、マルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS 440C)、及び析出硬化型ステンレス鋼 (SUS 630) で、軌道輪を作製した。マルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS 440C) は、900~950℃の温度から油焼入れし、150~200℃で焼戻しを施した。析出硬化型ステンレス鋼 (SUS 630) 920~970℃の温度から溶体化処理し、450~500℃で時効処理をした。

- 10 上述の条件で製作した各転がり軸受について、耐圧痕性試験及び転がり寿命試験を行った。

〔耐圧痕性試験〕

- 15 耐圧痕性試験は、チタン合金製外輪 1 を 1/4 に切断したものをを用いた。1/4 に切断された軌道輪 (外輪 1) の軌道面上に直径 4.76 mm の窒化珪素製球状転動体 3 を押し当て、この状態で転動体 3 を介して軌道輪 1 の軌道面に 980 N の荷重を負荷した。そして、負荷荷重が負荷された箇所の軌道面に生じた圧痕の最大深さを測定した。

耐圧痕性試験の試験結果 (圧痕深さ) を表 15 に、また耐圧痕性試験の試験結果と H/E との関係を図 20 に示す。

表15

No.	軌道輪材料	転動体材料	2~5%Da硬さ H (Hv)	ヤング率 E (GPa)	H/E	圧痕深さ (μm)	転がり寿命比
1	Ti-6Al-4V	酸化アルミニウム系セラミックス	421	113	3.7	1.1	2.4
2	Ti-6Al-4V	13Cr系ステンレス鋼	434	113	3.8	1.0	2.5
3	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	炭化けい素系セラミックス	436	109	4.0	0.8	2.4
4	Ti-22V-4Al	窒化けい素系セラミックス	440	105	4.2	0.9	2.6
5	Ti-22V-4Al	13Cr系ステンレス鋼	463	105	4.4	0.8	2.7
6	Ti-15Mo-5Zr-3Al	酸化アルミニウム系セラミックス	473	109	4.3	0.9	2.6
7	Ti-15Mo-5Zr-3Al	13Cr系ステンレス鋼	483	109	4.4	0.7	2.8
9	Ti-15Mo-5Zr-3Al	炭化けい素系セラミックス	495	109	4.5	0.8	2.8
9	Ti-15Mo-5Zr-3Al	窒化けい素系セラミックス	519	109	4.8	0.8	2.6
10	Ti-15Mo-5Zr-3Al	酸化ジルコニウム系セラミックス	548	110	5.0	0.7	2.7
1'	Ti-6Al-4V	窒化けい素系セラミックス	385	113	3.4	2.0	2.0
2'	Ti-22V-4Al	13Cr系ステンレス鋼	405	111	3.6	1.6	1.9
3'	SUS440	13Cr系ステンレス鋼	667	210	3.2	2.4	1.7
4'	SUS630	窒化けい素系セラミックス	485	200	2.4	4.8	1.0

実施例

比較例

表15及び図20からわかるように、本発明の実施例に相当するNo.1～10では、比較例であるNo.1'～4'に比較して、軌道面に生じた圧痕深さが低い値を示している。これは、No.1'～4'の軸受は軌道輪材料の硬さとヤング率の比(H/E)が2.4～3.6であるのに対し、No.1～10の軸受は軌道輪材料の硬さとヤング率の比(H/E)が3.7以上となっているためである。

[転がり寿命試験]

転がり寿命試験は、次の方法で行った。まず、回転数：500rpm、ラジアル荷重：69N、アキシアル荷重：20Nの条件で内輪を回転させたときの軸受の初期振動値を測定する。次に、転がり軸受を転がり寿命試験機から取り外し、軌道輪の端面を床面に向け、20Nの予圧をかけた状態で軸受を1mの高さから落下させる。その後、軸受を再び転がり寿命試験機にセットし、前記と同じ条件で内輪を回転させたときの軸受の振動値を測定する。そして、その測定値が初期振動値の5倍を超えた時点を転がり寿命と評価した。

転がり寿命試験の試験結果(転がり寿命比)を表15に、また転がり寿命試験の試験結果と H/E との関係を図21に示す。表15及び図21の転がり寿命比は、No.4'の転がり寿命を1として評価したときの比較値である。

表15及び図21からわかるように、本発明の実施例に相当するNo.1～10では、比較例であるNo.1'～4'に比較して、転がり寿命比が高い値を示している。これは、No.1'～4'の軸受は軌道輪材料の硬さとヤング率の比(H/E)が2.4～3.6であるのに対し、No.1～10の軸受は軌道輪材料の硬さとヤング率の比(H/E)が3.7以上となっているためである。

したがって、チタン合金製軌道輪の H/E を $3.7 \leq (H/E)$ とすることにより、チタン合金製軌道輪の耐衝撃性と耐摩耗性を高めることが可能となる。

また、上述した耐圧痕性試験および転がり寿命試験の試験結果から明らかなように、 H/E が3.7～4.8の場合と4.8を超える場合とでは効果に大きな差が認められず、 H/E の値を大きくするためには熱処理やショットピーニングなどの加工を必要とし、その分だけコストの上昇につながるので、チタン合金製軌道輪の H/E としては3.7～4.8の範囲内が好ましい。

表16に示される材料で試験用の転がり軸受を作製し、各試験軸受に対して次

のような転がり寿命試験を実施した。すなわち、各試験軸受の内輪をラジアル荷重：49 N、回転速度：1000 min⁻¹の条件で回転させたときの振動値を測定し、その測定値が回転開始直後の初期振動値の2倍に達した時点を軸受の転がり寿命として評価した。このとき、周囲温度を図22に示すパターンで変化させた。

- 5 た。
- なお、軌道輪材料がTi-6Al-4Vである場合には、表16に示されるように、920～1000℃の温度で溶体化処理された後、450～550℃の温度で5～20時間の時効処理が施されたチタン合金を使用した。また、軌道輪材料がTi-15Mo-5Zr-3Alである場合には、770～850℃の温度
- 10 で溶体化処理された後、400～500℃の温度で10～60時間の時効処理が施されたチタン合金を使用した。さらに、軌道輪材料がTi-22V-4Alである場合には、700～800℃の温度で溶体化処理された後、400～500℃の温度で5～40時間の時効処理が施されたチタン合金を使用した。溶体化処理での冷却は水冷で行い、時効処理での冷却は炉冷で行った。

表16

	No.	内輪・外輪	転動体	α_2/α_1	転がり寿命比
実施例	1	Ti-6Al-4V	炭化ケイ素系セラミックス	0.4	2.0
	2	Ti-6Al-4V	ジルコニア系セラミックス	1.2	2.6
	3	Ti-15Mo-5Zr-3Al	WC-C _o 系超硬合金	0.7	2.5
	4	Ti-15Mo-5Zr-3Al	炭化ケイ素系セラミックス	0.5	2.1
	5	Ti-15Mo-5Zr-3Al	アルミナ系セラミックス	0.9	2.8
	6	Ti-15Mo-5Zr-3Al	ジルコニア系セラミックス	1.3	2.3
	7	Ti-22V-4Al	TiC-Ni系サーメット	0.9	2.5
	8	Ti-22V-4Al	アルミナ系セラミックス	0.9	2.7
比較例	1'	Ti-6Al-4V	窒化ケイ素系セラミックス	0.3	1.0
	2'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	SUJ2	1.4	1.2
	3'	Ti-22V-4Al	SUJ2	1.5	0.9
	4'	ベリリウム銅	炭化ケイ素系セラミックス	0.2	0.3
	5'	ベリリウム銅	WC-C _o 系超硬合金	0.3	0.5
	6'	SUS630	窒化ケイ素系セラミックス	0.3	1.2

転がり寿命試験の試験結果（転がり寿命比）を表 1 6 に、また転がり寿命試験の試験結果と表 1 6 に示す線膨張係数比 α_2 / α_1 (α_1 : 軌道輪材料の線膨張係数、 α_2 : 転動体材料の線膨張係数) との関係を図 2 3 に示す。表 1 6 及び図 2 3 の転がり寿命比は、No. 1' の転がり寿命を 1 として評価した比較値である。

- 5 表 1 6 及び図 2 3 からわかるように、本発明の実施例に相当する No. 1 ~ 8 は、比較例である No. 2' 及び 3' に比較して、転がり寿命比が高い値を示している。これは、No. 2' 及び 3' は軌道輪材料と転動体材料との線膨張係数比が $\alpha_2 / \alpha_1 \geq 1.4$ であるのに対し、No. 1 ~ 8 は軌道輪材料と転動体材料との線膨張係数比が $\alpha_2 / \alpha_1 \leq 1.3$ となっているためである。また、本発明の実施例に相当する
- 10 No. 1 ~ 8 は、比較例である No. 1', 4' ~ 6' に比較して、転がり寿命比が高い値を示している。これは、No. 1', 4' ~ 6' は軌道輪材料と転動体材料との線膨張係数比が $\alpha_2 / \alpha_1 \leq 0.3$ であるのに対し、No. 1 ~ 8 は軌道輪材料と転動体材料との線膨張係数比が $\alpha_2 / \alpha_1 \geq 0.4$ となっているためである。

- したがって、軌道輪材料と転動体材料との線膨張係数比を $0.4 \leq \alpha_2 / \alpha_1 \leq 1.3$ とすることにより、周囲温度が大きく変動する環境下でも耐久性の優れた
- 15 転がり寿命が得られることがわかる。また、軌道輪材料と転動体材料との線膨張係数比を $0.4 \leq \alpha_2 / \alpha_1 \leq 1.3$ とすることにより、軸受内部の隙間や予圧および嵌め合い応力等の変化が緩和されるので、周囲温度に変動があっても軸受の回転性能が安定する。

- 20 本発明に係る転がり軸受の他の実施形態を図 2 4 に示す。同図において、転がり軸受は支持すべき軸（図示せず）の外周面に外嵌固定される内輪 2 と、この内輪 2 の外周に設けられた外輪 1 と、この外輪 1 と内輪 2 との間に転動自在に配設された複数の球状転動体 3 と、これらの球状転動体 3 を軌道輪 1 1, 1 2 の周方向に対して等間隔に保持する保持器 4 とを備えている。軌道輪 1 1, 1 2 の軸方
- 25 向両端部には、転動体 3 の両側に形成された開放空間を閉塞するシールド板 9 が設けられている。

ここで、内輪 2 及び外輪 1 は H v 4 2 0 以上の硬さを有するチタン合金（例えば $\alpha + \beta$ 型チタン合金、Near β 型チタン合金、 β 型チタン合金等）からなり、その比透磁率が 1. 0 0 1 以下となっている。また、転動体 3 は導電性ジルコニ

ア、窒化珪素等のセラミックス、好ましくは導電性セラミックスからなり、その比透磁率が1.001以下となっている。

保持器4は、保持器自身に電気絶縁性と自己潤滑性を持たせるために、例えば含フッ素樹脂、PEEK、PEEK-PBI、PPS、TPI、PEN、PFA、
5 ETFE、FEP、PCTFE、ECTFE、PVDF等の樹脂材にPTFE、MAC、黒鉛、N-ラウロ・L-リジン、hBN、弗素雲母等の固体潤滑剤を添加して形成されている。

シールド板9は純度99.5%以上のチタンからなり、このシールド板9の比透磁率は1.001以下となっている。また、シールド板9はリング状に形成されてお
10 り、その外周部には外輪1の内周面に形成されたシールド板保持溝1a、1aに着脱自在に嵌合する嵌合部9aが形成されている。

上述のように、内輪2及び外輪1をチタン合金で形成すると共に転動体3をセラミックスで形成すると、内輪2、外輪1及び転動体3の比透磁率が1.001以下となる。これにより、軸受周辺の磁束密度が内輪2または外輪1の回転によ
15 って大きく変化することがないので、ウエハ検査装置などの電子線を使用する機器に好適に使用することができる。また、シールド板9を純度99.5%以上のチタンで形成すると、シールド板9の比透磁率が1.001以下となる。これにより、転動体3や保持器4に照射される電子線をシールド板9で遮蔽することが可能となるので、電子線による転動体3のチャージアップを防止してハレーショ
20 ンの発生を防ぐことができる。また、保持器4を樹脂で形成することにより、保持器4の比透磁率が1.001以下となり、電子線が照射されても保持器4が電子線によってチャージアップされることがないので、ハレーションの発生を防ぐことができる。さらに、保持器4を構成する樹脂中に固体潤滑剤を添加して保持器4に自己潤滑性を付与することにより、保持器自身が潤滑剤として機能するので、潤滑油やグリースの使用が困難な真空雰囲気でも良好に使用することができ
25 る。

表17に示される材料で試験用の転がり軸受を作製し、作製した各試験軸受に対して、次のような磁束密度変化測定試験と軸受摩耗試験を行った。なお、表17に示されるチタン合金（内外輪材質）は、表18に示す条件で溶体化処理と時

効処理を施したものを使用した。

表17

No.	内外輪材質	転動体	シールド板材質	保持器材料	磁場変動の有無	電子線照射時のハレーションの有無	外径面 摩耗比
実施例							
1	Ti-15Mo-5Zr-3Al	導電性ジルコニア	純チタン(JIS2種)	ふっ素樹脂	無	無	0.22
2	Ti-15Mo-5Zr-3Al	窒化珪素	↑	↑	無	無	0.18
3	Ti-15Mo-5Zr-3Al (酸化処理)	窒化珪素	↑	↑	無	無	0.12
4	Ti-15Mo-5Zr-3Al	窒化珪素 (TiN被膜)	↑	↑	無	無	0.18
5	Ti-15Mo-5Zr-3Al	アルミナセラミックス (TiN被膜)	↑	↑	無	無	0.19
6	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	導電性ジルコニア	↑	↑	無	無	0.22
7	Ti-22V-4Al	窒化珪素	↑	↑	無	無	0.25
8	Ti-6Al-4V	窒化珪素	↑	↑	無	無	0.19
9	Ti-22V-4Al	窒化珪素 (TiN被膜)	↑	↑	無	無	0.24
10	Ti-6Al-4V	窒化珪素 (TiN被膜)	↑	↑	無	無	0.29
比較例							
1'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	窒化珪素	—	ふっ素樹脂	無	有	0.23
2'	Ti-15Mo-5Zr-3Al	窒化珪素	SUS304	ふっ素樹脂	有	無	0.21
3'	Ti-22V-4Al	窒化珪素	SPCC	ふっ素樹脂	有	無	0.20
4'	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	窒化珪素	純チタン(JIS2種)	SUS304	有	無	0.23
5'	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	窒化珪素	純チタン(JIS2種)	SPCC	有	無	0.22
6'	Be-Cu	Be-Cu	Be-Cu	Be-Cu	無	無	1.00

表18

種 類	溶体化処理条件	時効処理条件
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	750~800°C × 1Hr (水冷)	大気中450°C × 20Hr (徐冷)
Ti-22V-4Al	750~800°C × 1Hr (水冷)	大気中450°C × 20Hr (徐冷)
Ti-6Al-4V	950~1000°C × 1Hr (水冷)	大気中400~500°C × 20Hr (空冷)
Ti-15Mo-5Zr-3Al (酸化処理)	735~850°C × 1Hr (水冷)	大気中425°C × 20Hr (徐冷) + 大気中475°C × 7Hr (徐冷)
Ti-15Mo-5Zr-3Al	735~850°C × 1Hr (水冷)	真空中425°C × 20Hr (徐冷) + 真空中475°C × 7Hr (徐冷)

〔磁束密度変化測定試験〕

磁束密度変化測定試験は、次のような方法で行った。すなわち、図5に示されるように、永久磁石16の磁界中に配置された回転軸13に試験軸受10を取り付けた後、回転軸13を約200rpmの速度で回転させ、そのときの磁束密度
5 の変化をテスラーメータ17で測定した。そして、図6に示すテスラーメータの出力が最大で0.1mT以上になったものを磁束密度の変化が有りとし、0.1mT未満のものを磁束密度の変化が無しとした。

〔軸受摩耗試験〕

軸受摩耗試験は、次のような方法で行った。すなわち、図25に示すように、
10 シリコンウエハ33を3個の試験軸受10で支持し、この状態で電子銃32からシリコンウエハ33に電子線を照射しながらシリコンウエハ33のローディング及びアンローディングを行った。そして、シリコンウエハ33のローディング・アンローディングを15万回繰り返し行った後で、試験軸受10の外輪摩耗量を測定した。また、これと同時に、電子線を照射した場合の転がり軸受部分におけるハレーション発生の有無を検出器31で確認した。
15

磁束密度変化測定試験と軸受摩耗試験の試験結果を表17に示す。表17の軸受摩耗試験結果である摩耗比は、No. 6'の外輪摩耗量を1として評価した場合の比較値である。

表17の試験結果からわかるように、本発明の実施例であるNo. 1~10は、
20 比較例であるNo. 6'と比較して外輪表面の摩耗量が低い値を示している。これは、No. 6'は軌道輪がベリリウム銅から形成されているのに対し、No. 1~10は軌道輪がベリリウム銅よりも硬さの硬いチタン合金から形成されているためである。

また、本発明の実施例であるNo. 1~10は、比較例であるNo. 4'及び
25 5'と比較して、磁束密度の変化値が小さい値を示している。これは、No. 4'及び5'は保持器がSUS304やSPCC等の鉄鋼材料から形成されているのに対し、No. 1~10は保持器がフッ素樹脂等の樹脂から形成されているためである。

さらに、本発明の実施例であるNo. 1~10は、比較例であるNo. 2'及

び3'と比較して、電子線によるハレーションの発生確率が低い値を示している。これは、No. 2'及び3'の軸受はシールド板がSUS304やSPCC等の鉄鋼材料から形成されているのに対し、No. 1~10の軸受はシールド板が純度99.5%以上のチタンから形成されているためである。

- 5 したがって、軌道輪をチタン合金製とし、転動体をセラミックス製とし、保持器を樹脂製とすると共にシールド板を純度99.5%以上のチタンから形成することによって、耐食性および非磁性が要求される環境下で好適に使用できる転がり軸受を得られることがわかる。

- 本発明の実施例であるNo. 4, 5, 8はセラミックス製転動体の表面にTiN等の硬質被膜を形成した例であり、このようにセラミックス製転動体の表面にTiN等の硬質被膜を形成することにより導電性を確保できる。

- 軌道輪の構成材料として用いられるチタン合金の種類としては、時効処理によって硬化するチタン合金（例えば $\alpha + \beta$ 型チタン合金、Near β 型チタン合金、 β 型チタン合金等）が好ましく、具体的には、Ti-6Al-4V、Ti-6246、Ti-15Mo-5Zr-3Al、Ti-22V-4Al、Ti-15Mo-3Cr-3Sn-3Alがあげられる。これ以外にも時効硬化処理によって硬さがHv420以上のチタン合金であれば好適に使用できる。

- より優れた耐焼付性と耐摩耗性を必要とする場合には、チタン合金を大気中で加熱して酸化処理を施し、チタン合金の表面に TiO_x ($0 < x < 2$) からなる酸化被膜を形成することにより、軌道輪表面の摺動性をさらに向上させることができる。この場合、酸化処理温度としては、時効処理温度である400~500℃にすることによって、時効硬化処理と酸化処理を同時に行えたとともに、この温度範囲で形成される酸化被膜が極めて緻密となり、密着性が向上するので好適である。また、チタン合金を700~1000℃の温度で溶体化処理し、さらに研磨後に酸化処理を施すと、チタン合金製軌道輪の転動面に酸化被膜を形成することが使用できる。この場合、チタン合金製軌道輪の転動面に超仕上げ加工した後、酸化処理を施すと更に良好な摺動性を得ることができる。

 ウエハ検査装置などのように電子線を利用する機器では、周囲雰囲気 10^{-4} Pa以上の高真空雰囲気にする必要がある。このため、電子線を利用する機器

で使用される転がり軸受では、潤滑剤として潤滑油やグリースを使用できないので、自己潤滑性を有する樹脂で保持器を形成すれば潤滑性を改善でき、転がり軸受の耐摩耗性を向上させることができる。また、保持器を樹脂で形成すると保持器の比透磁率が1.001以下となり、保持器材料によって磁束密度が大きく変化するものもないので、電子線を利用した半導体製造装置用として好適である。

- 保持器材料としては、含フッ素樹脂、ポリエーテルエーテルケトン（PEEK）、ポリエーテルエーテルケトンとポリベンゾイゾミダールのコポリマー（PEEK-PBI）、ポリフェニレンサルファイド（PPS）、熱可塑性ポリイミド（TPI）、ポリエーテルニトリル（PEN）、熱可塑性芳香族ポリアミドイミド、
- 10 テトラフルオロエチレン・パーフルオロアルキルビニルエーテル共重合体（PTFE）、テトラフルオロエチレン・エチレン重合体（ETFE）、テトラフルオロエチレン・ヘキサフルオロプロピレン共重合体（FEP）、ポリクロロトリフルオロエチレン（PCTFE）、クロロトリフルオロエチレン・エチレン共重合体（ECTFE）、ポリビニリデンフルオライド（PVDF）等が好適である。
- 15 これらの樹脂に添加される固体潤滑剤としては、四弗化エチレン樹脂粉末（PTFE）、黒鉛、六方窒化ホウ素（hBN）、フッ素雲母、メラミンシアヌレート（MCA）、層状の結晶構造を有するアミノ酸化合物（N-ラウロ・L-リジン）、弗化黒鉛、弗化ピッチ、二硫化モリブデン（ MoS_2 ）、二硫化タングステン（ WS_2 ）のうち少なくとも1種類を使用でき、その中でも特に、PTFE、
- 20 MAC、黒鉛、N-ラウロ・L-リジン、hBN、フッ素雲母を単独または2種類以上を組み合わせたものが潤滑性の点でより好ましい。

- 転動体を形成するセラミックスや保持器を形成する樹脂は絶縁材であるため、半導体製造装置のウェハ支持部、特に電子線の近傍の画像として見える範囲内に絶縁体が存在すると、絶縁体である転動体や保持器がチャージアップされ、ハレーションを発生させる。
- 25

また、ウェハを支持する軸受では、軸受自身に導電性がないと、例えば測長SEMの場合では軸受内部に電流が流れなくなるため、所望の画像が得られない。したがって、転動体の構成材料として用いるセラミックスとしては導電性を有するものが望ましく、具体的には、導電性ジルコニア系のセラミックスが好適であ

る。

また、窒化珪素系セラミックス、アルミナ系セラミックスのような絶縁性セラミックスの場合には、PVC (Physical Vapor Deposition)、CVD (Chemical Vapor Deposition) 等のコーティング処理によって導電性を有する
5 TiN、TiC、TiCN、TiAlNのようなチタン系のセラミックコーティング被膜を転動体の表面に施すとよい。

一方、保持器に関しては、軸受の導電性には影響しないが、上述したように絶縁体であるので電子線が照射されるとハレーションを発生させる。また、保持器の樹脂材は上述のような被膜処理が困難であるため、転動体のような導電性のセラミックコーティングによってチャージアップを防ぐことはできない。そこで、
10 電子線を利用する機器に使用される転がり軸受を金属製のシールド板を備えたシールドタイプの転がり軸受にすることによって、保持器部分がシールド板によって隠れるため、電子線によるハレーションの発生を防止することができる。

また、転動体に絶縁性のセラミックスを使用した場合でも、純チタン製のシールド板を使用することによって、周辺磁場に影響を与えることなくハレーションの発生を防止できる。
15

シールド板はプレス成形によって製造されるため、室温での塑性加工が必要である。シールド板に使用される材質は、従来、SUS304に代表されるオーステナイト系のステンレス鋼板、冷間圧延鋼板 (JIS SPCC、SPCD、SPCE) であるが、いずれも鋼を主体とした材料であるため、比透磁率が1.0
20 01以上であり、周辺磁場に影響を与えてしまう。

一方、シールド板を純度99.5%以上のチタンで形成すると、シールド板の比透磁率が1.001以下となる。これにより、シールド板の回転によって周辺磁場に電子線を曲げるような磁束密度の変化が生じることがないので、電子線発生部近傍で使用する転がり軸受のシールド板として好適である。純チタンは、冷
25 間成形性が極めて良好であるため、薄板の製造が可能であり、さらにプレス成形による加工が可能であるので、シールド板を低コストで製造できる。

シールド板材料として使用されるチタンとしては、JIS 1~4種のいずれも好適に使用することができ、プレス成形性の観点から、不純物含有量が少ない

1種、2種が特に好適である。

上述した本発明に係る転動装置の好適な用途としては、以下の通りである。

[非磁性]

- 5 半導体素子の高集積化に伴い、ウエハに形成される集積回路パターンの微細化が進行している。半導体製造装置やウエハ検査装置などは、従来、レーザ光を利用していたが、回路パターンの微細化に伴い高分解能が必要となり、レーザ光よりも短波長で高分解能の電子線を利用した装置へと移行しつつある。

- 10 電子線はわずかな磁場によっても容易に曲げられてしまい、ウエハの描画精度や検査精度を低下させる。このため、電子線を使用することに伴ってウエハの搬送ステージやウエハの支持部等で使用される転がり軸受に非磁性の要求が高まっている。このような電子線を利用した半導体製造装置では、比透磁率が1.01～1.1程度の非磁性ステンレス鋼製転がり軸受を使用すると電子線に影響を及ぼす磁場変動が生じてしまうため、比透磁率が1.001以下のベリリウム銅製転がり軸受を使用している。

- 15 チタン合金は、比透磁率が1.001以下の完全非磁性材であるので、電子線を利用した半導体製造装置に使用される転がり軸受やリニアガイド等の構成材料として好適である。

- 20 電子線発生源である電子銃近傍で転がり軸受やリニアガイド等を使用する場合には、転がり軸受の回転運動やリニアガイドの直線運動により磁場変動が生じ、これにより電子線が曲げられるので、転がり軸受やリニアガイドの比透磁率を1.001以下とする必要がある。

- 25 電子線を利用した半導体製造装置としては、具体的には、測長SEM、ステップ、電子ビーム描画装置、ウエハ欠陥検査装置等が挙げられ、上記した装置のウエハ支持するホルダやステージ稼働部などに本発明の転動装置を好適に使用できる。

また、電子線を利用した計測装置としては、具体的には、電子線マイクロプロブアナライザ（EPMA）の分光結晶の回転部や試料ステージ、走査型電子顕微鏡（SEM）、集束イオンビームFIB、透過電子顕微鏡（TEM）、ESCA、オージェ電子分析装置等があげられ、電子発生源に近い箇所の稼働部などに本発

明の転動装置を好適に使用できる。

また、磁場を使った半導体製造装置としては、強力な永久磁石により磁場をかけながら電圧を印加する方式のエッチング装置などがあげられ、チャンバ内にウエハを搬送する搬送ロボットアームの関節部等に本発明の転動装置を好適に使用
5 できる。

強磁界中で使用される転がり軸受、例えばリニアモーターカーの超電動マグネット近傍で使用される車軸支承用の転がり軸受は、車軸の回転中は超電動マグネットからの強い磁界を切って回転する。このため、転がり軸受がマルテンサイト鋼などの強磁性体で製作されている場合には、軸受の転動体や軌道輪に渦電流が生
10 じて発熱し、温度上昇に伴って焼付きを生じる恐れがある。

このような強磁界で使用される軸受は、非磁性とする必要がある。本発明に係る転がり軸受の軌道輪はチタン合金製から形成され、非磁性鋼よりも比透磁率が低い。従って、渦電流の発生が少なく、好適に使用できる。

核磁気共鳴診断装置に使用される転がり軸受は、軸受の回転に伴う磁場の変動
15 が検査精度を低下させる。本発明に係る転がり軸受のチタン合金製軌道輪は、比透磁率が1.001以下の完全非磁性であるので、核磁気共鳴診断装置の回転部等に好適に使用できる。

〔耐食性〕

ウエハ洗浄装置などに使用される転がり軸受、直動案内装置、ボールねじ等の
20 転動装置の場合は、アンモニア溶液等のアルカリ性液や強酸性液が半導体ウエハの洗浄で使用される。そのため、アルカリ性液や強酸性液の飛散、或いはそれらの蒸気中に暴露されることによる半導体製造工程への不純物の混入が重要な問題となっている。また、エッチング装置は腐食性ガスを使用するので、耐食性が必
要となる。

25 本発明に係る転動装置は、アンモニア溶液等のアルカリ性液でも十分な耐食性を有するため、酸化チタンコーティングによって抗菌性を付与させることも可能である。

同様に、写真現像機は、現像工程や定着工程で腐食性の薬剤が使用されるので、写真現像機の搬送コンベアの支持軸受や、薬剤を補給するポンプに使用される軸

受にも本発明の転がり軸受を好適に使用できる。

[軽量・耐衝撃（ヤング率）]

本発明に係る転がり軸受のチタン合金製軌道輪は、その比重が鋼の約 $2/3$ と小さいので、製軌道輪の軽量化を図ることができる。

- 5 穿孔や切削などを行う歯科機械のハンドピースは、軸に取り付けた歯科用切削工具を30000rpm以上の速度で超高速回転させて使用されるため、軽量性や静穏性など求められる。このため、歯科機械のハンドピースで使用される軸受についても軽量性や低騒音性が要求される。

- 10 チタン合金製軌道輪は比重が鋼の約 $2/3$ と小さいので、ハンドピースが軽量化する。また、軸受の回転トルクも小さくなり、低騒音化が可能になるので、歯科用ハンドピース用の転がり軸受として本発明の転がり軸受を好適に使用できる。

また、駆動モータにおいては、回転数を短時間で最高回転数に到達させるために高出力のモータが使用されており、最高回転数で切削等の加工を行う際に実際に要求される出力に対して大幅に出力余裕のある駆動モータが使用される。

- 15 駆動モータの出力を低減させるには、起動時から最高回転数に到達するまでの立ち上がり時間や最高回転数の低減、駆動モータにより回転駆動する回転軸の慣性力の低減等が考えられるが、立ち上がり時間を長くしたり、最高回転数を低く抑制すると加工効率の低下を招くことから、加工効率を所望の高精度に維持しつつ駆動モータの出力を低減させるためには、回転軸の慣性力を低減させることが
20 最も効果的である。

回転軸の慣性力を低減させるためには回転軸の重量を低減させることが必要であり、従来の鉄鋼材料（比重：約7.8）に比べ比重の小さいチタン合金（比重：約4.0～5.0）を使用するのが効果的で、所望の加工効率を損なうことなく装置の小型化や駆動モータの消費電力を低減することができ、好適である。

- 25 チタン合金製軌道輪は軽量でヤング率が小さいので、一般産業機械用や自動車用トランスミッションなどの駆動系に使用される玉軸受、円筒ころ軸受、円錐ころ軸受、自動調心ころ軸受の軌道輪を軽量化することが可能となり、装置全体を軽量化することが可能である。また、本発明の転がり軸受は軽量であるため、高速回転化と可能となり、好適である。さらに、同一荷重が負荷された場合に軌道

輪のヤング率が鋼の1/2と小さく、チタン製軌道輪は転動体と接触する部位の面圧が下がる効果があり、接触部での応力が下がるので、転動疲労強度を増大させることができるという効果がある。

- 5 その他、工作機械のスピンドル、ターボチャージャなど、 $dmn=20$ 万以上の高速回転下で使用されるアンギュラ玉軸受、円筒ころ軸受として本発明の転がり軸受を使用すると高速回転時の慣性力が小さくなるので、好適に使用することができる。

- 10 回転陽極X線管用の軸受では、軸受を支持する回転陽極の先端に取り付けたターゲットに熱電子を衝突させてX線を発生させるが、ターゲットの帯電を防ぐためには、軸が軸受を介して接地されていなければならない。また、真空、高速、高温の条件にありながらセラミックスではなく、SKH等の耐熱鉄鋼材料が用いられている。本発明に係る転がり軸受は、軽量であるため、高速回転化が可能であり、高温でも硬さ低下がなく、更に導電性を有しているので、回転陽極X線管用軸受として好適に使用できる。この場合、転動体としては導電性を有するセラミックスが好適である。

- 20 コンピュータや携帯電話などの電子機器製造工程で用いられる部品装着機は、半導体デバイスなどの精密部品を取り出し、基板に装着する作業が高速化され、特に、最近では電子機器自体の小型化の要求に伴い、基板に配置される半導体デバイスが小型化すると共に基板上の集積化が進み、部品を装着する場合の位置決め精度は数 μm オーダにまで達している。また、基板の生産効率向上のために取付け速度も増加する傾向にあり、1サイクルが0.5~1.0秒以下となる速度で部品を装着するため、ヘッドを支持する直動装置も高速化している。また、同様に基板に装着された半導体デバイスを回路に接続するワイヤボンダなどでは、直動案内レールのベアリング部を固定し、先端に部品装着用のヘッドなどを固定したレールが上下動する構造となっている。多くの実装機では部品の吸着、基板への装着、固定などの一連の取付け工程を連続して行うため、複数のレールをドラム上に配置し、ドラムを回転させながら連続的に部品を装着していく、マシンガン方式が採用されており、直動レールには部品を装着するための上下動に加え、この上下動に同期したドラムの回転による回転加速度が付与され、レール自重と

ヘッド自重によって発生する慣性力がレールに曲げモーメントとして作用する。特に、レールの上下動のサイクル時間が0.1秒以下になると、レールに作用する加速度は数G～数十G程度になり、これに加えてドラムの円周方向への加速度も数G程度となる。本発明に係る転動装置は、従来の鋼製のものに比べて大幅に

5 軽量化できるため、レールに負荷される加速度を低減することができ、部品装着機用直動案内装置として好適に使用できる。

また、自動車の小型化及び軽量化に伴い、オルタネータ等のエンジン補機類にも小型化及び軽量化と共に高性能化、高出力化が求められ、エンジンの作動時に当たって、例えばオルタネータ用軸受には、使用条件が従来よりも厳しい高速回転に伴う高振動、高荷重（重力加速度で4G～20G位）がベルトを介して同時に作用し、かつ高温条件下（約90～130℃）で使用されている。

10

本発明に係る転がり軸受は軽量であり、上述したエンジン補機類を軽量化できるので好適である。

更に、高振動、高荷重、高温の厳しい環境下では、従来の鋼製軸受は、特に、

15 固定輪である外輪負荷圏の最大せん断応力位置近傍に白色組織変化が発生し、この組織変化が起点となり、軸受設計寿命の約1/5～1/20で早期剥離を生じてしまう。本発明に係る転がり軸受のチタン合金製軌道輪は高温でも組織が安定であり、白色組織変化に例示されるような組織変化が生じないので、長寿命化を図ることができる。

20 [低熱伝導率]

複写機、レーザビームプリンタ（LBP）、ファクシミリなどの事務機器に使用される転がり軸受（例えばLBPの定着部で使用されるヒートロール用軸受や加圧ロール用軸受など）は、例えば200～250℃程度の高温下で使用されるため、さらに使用条件が厳しい（定着部以外の箇所では100～150℃程度）。

25 そのうえ、省資源化のため、定着部のリサイクル使用が要求されている。これに加えて、ヒートロールには、省エネルギー化のために高温のヒートロールから外部に熱を逃がしにくい特性も要求されている。

チタン合金は金属材料の中で熱伝導率が小さいので、軌道輪がチタン合金製の転がり軸受をヒートロール用軸受として使用した場合には、軸受を介してヒート

ロールから外部へ伝わる熱量を低減できる。

[線膨張係数]

- ビデオテープレコーダ (VTR) やハードディスク装置 (HDD) 等の情報記録装置は、再現画像の繊細さ、情報記録量の高密度化が望まれ、高回転精度化が進んでいる。高回転精度化の要求を満たすための軸受として、対向する二つの転がり軸受間に予圧を負荷した、いわゆる組合せ軸受ユニットが用いられている。軸受間に予圧を負荷することにより、主軸の剛性向上、振れ回り減少、共振周波数の回避等の効果が得られる。

- 転がり軸受の転動体を窒化珪素から形成した場合、予圧が減少して主軸の回転精度が低下することがある。これは、軸受の使用温度範囲における転動体の線膨張係数 ($1 \sim 9.0 \times 10^{-6} / K$) が軸受鋼やステンレス鋼からなる軌道輪のそれと比較して非常に小さいことに原因がある。即ち、軸受回転時の温度上昇による軌道輪の熱膨張量に対して転動体の熱膨張量が小さく、これに伴い軸受の内部隙間量が増大して、もともと軸受間に負荷してある予圧荷重が減少し、場合によっては完全な予圧抜けになることもある。この予圧抜けにより、軸の剛性低下、軸の振れ回り増大、軸の共振周波数変化などの回転性能低下を引き起こす。

- また、転動体を窒化珪素から形成した場合のもう 1 つの問題点として、軸受の耐衝撃性低下が挙げられる。即ち、軸受に過大な衝撃荷重が外部から加わった場合、転動体と軌道輪と転動体との接触部に応力が集中し、その結果として軌道輪の軌道面に微小圧痕が生じる場合がある。この圧痕の発生は、軸受の音響性能や振動性能を著しく低下させ、VTR や HDD 等の性能低下を招く。これは、転動体を軸受鋼やステンレス鋼から形成した場合に比較して転動体のヤング率が高く、軌道輪が弾性変形し難いため、軌道面の圧痕発生の原因となる応力集中を顕著にし、圧痕を生じやすいためである。

- この場合、軌道輪をチタン合金から形成すると軌道輪の線膨張係数が $8.0 \sim 9.0 \times 10^{-6} / K$ となるので、予圧抜けが生じにくくなる。また、転動体をジルコニア系セラミックスから形成することにより、軌道輪と転動体の線膨張係数の差を小さくすることができるので好適である。

また、耐衝撃性については、転動体を軸受鋼やステンレス鋼から形成した場合

に比較して転動体のヤング率が低く、過大な衝撃荷重が加わった場合でも応力集中による圧痕の発生が抑制されるため、軸受の音響性能や振動性能を低下させることもない。

請求の範囲

1. 軌道面をそれぞれ有する外方部材及び内方部材と、前記外方部材または内方部材の回転もしくは直線運動により前記軌道面上を転動する転動体とを備えた転動装置であって、

- 5 前記外方部材および／又は内方部材が β 型チタン合金、near 型チタン合金、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金のいずれか1種類のチタン合金から構成されることを特徴とする転動装置。

2. 前記チタン合金は、Hv400以上でHv600未満の表面硬さを有することを特徴とする請求項1記載の転動装置。

- 10 3. 前記外方部材および／又は内方部材は、Hv420以上の芯部硬さを有すると共に酸素化合物層を表面に有し、該酸素化合物層はルチル型 TiO_2 を含むチタン酸化物からなり且つ20nm以上の厚さを有していることを特徴とする請求項2記載の転動装置。

4. 前記外方部材および／又は内方部材の芯部硬さがHv450以上であり、
15 前記酸素化合物層の厚さが50nm以上であることを特徴とする請求項3記載の転動装置。

5. 前記転動体は、チタン合金、窒化珪素、炭化珪素、ジルコニア系セラミックス、アルミナ系セラミックス、サイアロン系セラミックスのうちいずれか1種類の材料から構成されることを特徴とする請求項1記載の転動装置。

- 20 6. 軌道面をそれぞれ有する外方部材及び内方部材と、前記外方部材または内方部材の回転もしくは直線運動により前記軌道面上を転動する転動体と、前記転動体を保持する保持器とを備えた転動装置であって、前記外方部材および／又は内方部材が β 型チタン合金、near 型チタン合金、 $\alpha + \beta$ 型チタン合金のいずれか1種類のチタン合金から構成され、かつ前記チタン合金はHv400以上でH
25 v600未満の表面硬さを有し、前記保持器は20W/(m·K)以上の熱伝導率を有することを特徴とする転動装置。

7. 前記保持器は、銅、テルル銅、黄銅、アルミ青銅、リン青銅、洋白、キュープロニッケル、ベリリウム銅のうちいずれか1種類の材料から構成されることを特徴とする請求項6記載の転動装置。

8. 軌道面をそれぞれ有する外方部材及び内方部材と、前記外方部材または内方部材の回転もしくは直線運動により前記軌道面上を転動する転動体を備えた転動装置であって、前記外方部材、内方部材、転動体の少なくとも1つがチタン合金から構成され、かつ結晶粒子の大きさが $1\mu\text{m}$ 以下の ω 相を有することを特徴とする転動装置。

9. 前記結晶粒子の大きさが 800nm 以下であることを特徴とする請求項8記載の転動装置。

10. 前記結晶粒子の大きさが 10nm 以下であることを特徴とする請求項8記載の転動装置。

11. 前記外方部材および／又は内方部材は、前記軌道面上に硬質膜を有することを特徴とする請求項1記載の転動装置。

12. 前記硬質膜が形成される軌道面は、 H_v350 以上の表面硬さを有することを特徴とする請求項11記載の転動装置。

13. 前記硬質膜が形成される軌道面は、 H_v450 以上の表面硬さを有することを特徴とする請求項11記載の転動装置。

14. 前記硬質膜は、 TiN 、 TiC 、 TiCN 、 TiAlN 、 CrN 、 SiC 、ダイヤモンドライクカーボンのうち少なくとも1種類の材料から構成されることを特徴とする請求項11記載の転動装置。

15. 前記外方部材および／又は内方部材は、前記硬質膜上に $0.1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ の潤滑性膜を有することを特徴とする請求項11記載の転動装置。

16. 前記外方部材および／又は内方部材は、前記硬質膜上に $0.1\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ の潤滑性膜を有することを特徴とする請求項11記載の転動装置。

17. 前記転動体は、超硬合金又はサーメットから構成されることを特徴とする請求項1記載の転動装置

18. 前記転動体は、 $35\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上の熱伝導率を有することを特徴とする請求項17記載の転動装置。

19. 前記転動体は、 $50\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上の熱伝導率を有することを特徴とする請求項17記載の転動装置。

20. 前記転動体は、鉄鋼材料から構成され、かつ耐食性を持つ表面硬化層を

表面に有することを特徴とする請求項 1 記載の転動装置。

2 1. 前記表面硬化層は、前記転動体を構成する母材の表面にクロム拡散浸透処理を施して形成されていることを特徴とする請求項 2 0 記載の転動装置。

5 2 2. 前記表面硬化層は、前記転動体を構成する母材の表面に窒化処理を施して形成されている窒化層を含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の転動装置。

2 3. 前記チタン合金は、そのヤング率を E (G p a)、前記軌道面から転動体直径の $2/100 \sim 5/100$ に相当する深さ位置までの最小硬さを H ($H v$) としたとき、 $3.7 \leq (H/E)$ の条件を満たすチタン合金であることを特徴とする請求項 1 記載の転動装置。

10 2 4. 前記チタン合金は、そのヤング率を E (G p a)、前記軌道面から転動体直径の $2/100 \sim 5/100$ に相当する深さ位置までの最小硬さを H ($H v$) としたとき、 $4.0 \leq (H/E)$ の条件を満たすチタン合金であることを特徴とする請求項 1 記載の転動装置。

15 2 5. 前記 (H/E) は、4.5 以下であることを特徴とする請求項 2 3 又は 2 4 記載の転動装置。

2 6. 前記チタン合金の線膨張係数 α_1 と前記転動体の線膨張係数 α_2 との比 α_2/α_1 が 0.4 ~ 1.3 の範囲内であることを特徴とする請求項 1 記載の転動装置。

20 2 7. 前記転動装置は前記外方部材と内方部材との間に形成された開口を遮蔽するシールド板をさらに備え、該シールド板が純度 99.5% 以上のチタンから形成されていることを特徴とする請求項 1 記載の転動装置。

2 8. 前記外方部材および内方部材は、 TiO_x ($x=0 \sim 2$) を含む酸化被膜を表面に有することを特徴とする請求項 2 6 記載の転動装置。

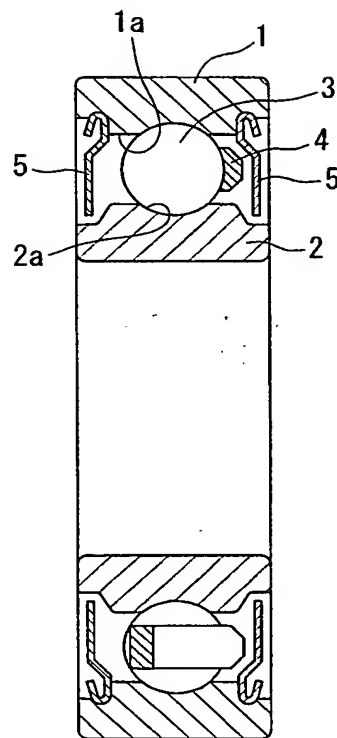
25 2 9. 前記転動体は、チタン合金、窒化珪素、炭化珪素、ジルコニア系セラミックス、アルミナ系セラミックス、サイアロン系セラミックスのうちいずれか 1 種類の材料から構成されることを特徴とする請求項 8、11、16、19、22、25、26 のいずれかに記載の転動装置。

3 0. 前記転動装置は前記転動体を保持する保持器をさらに備え、該保持器は、銅、テルル銅、黄銅、アルミ青銅、リン青銅、洋白、キュプロニッケル、ベリリ

ウム銅のうちいずれか 1 種類の材料から構成されることを特徴とする請求項 2、
11、16、19、22、25、26 のいずれかに記載の転動装置。

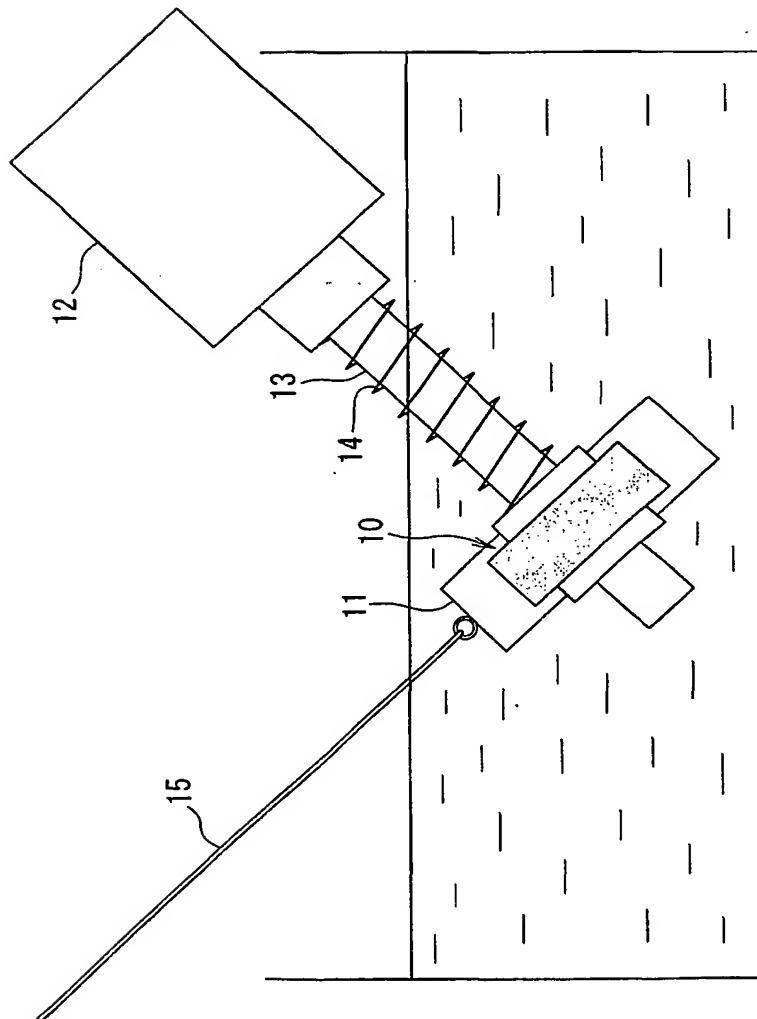
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 1



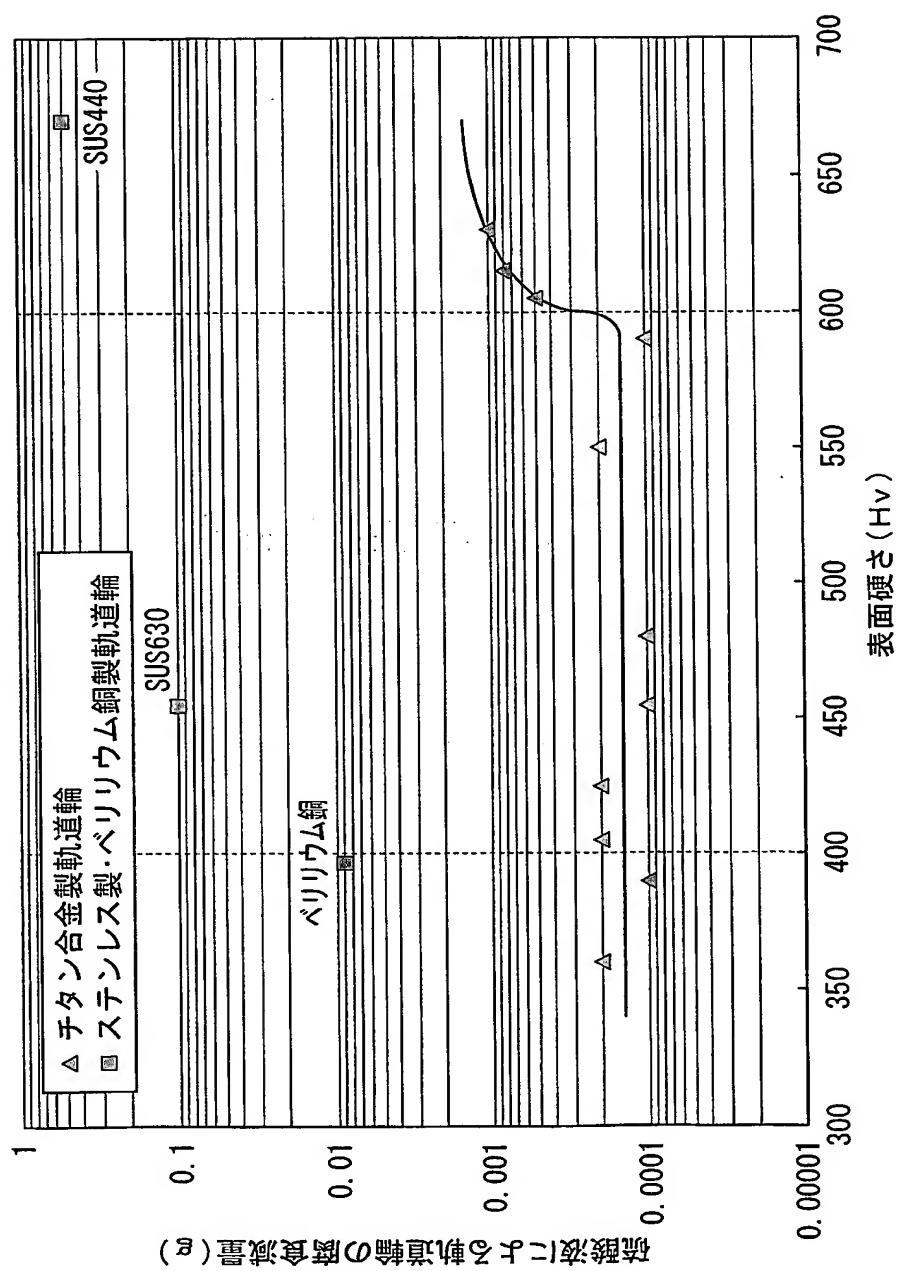
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 2



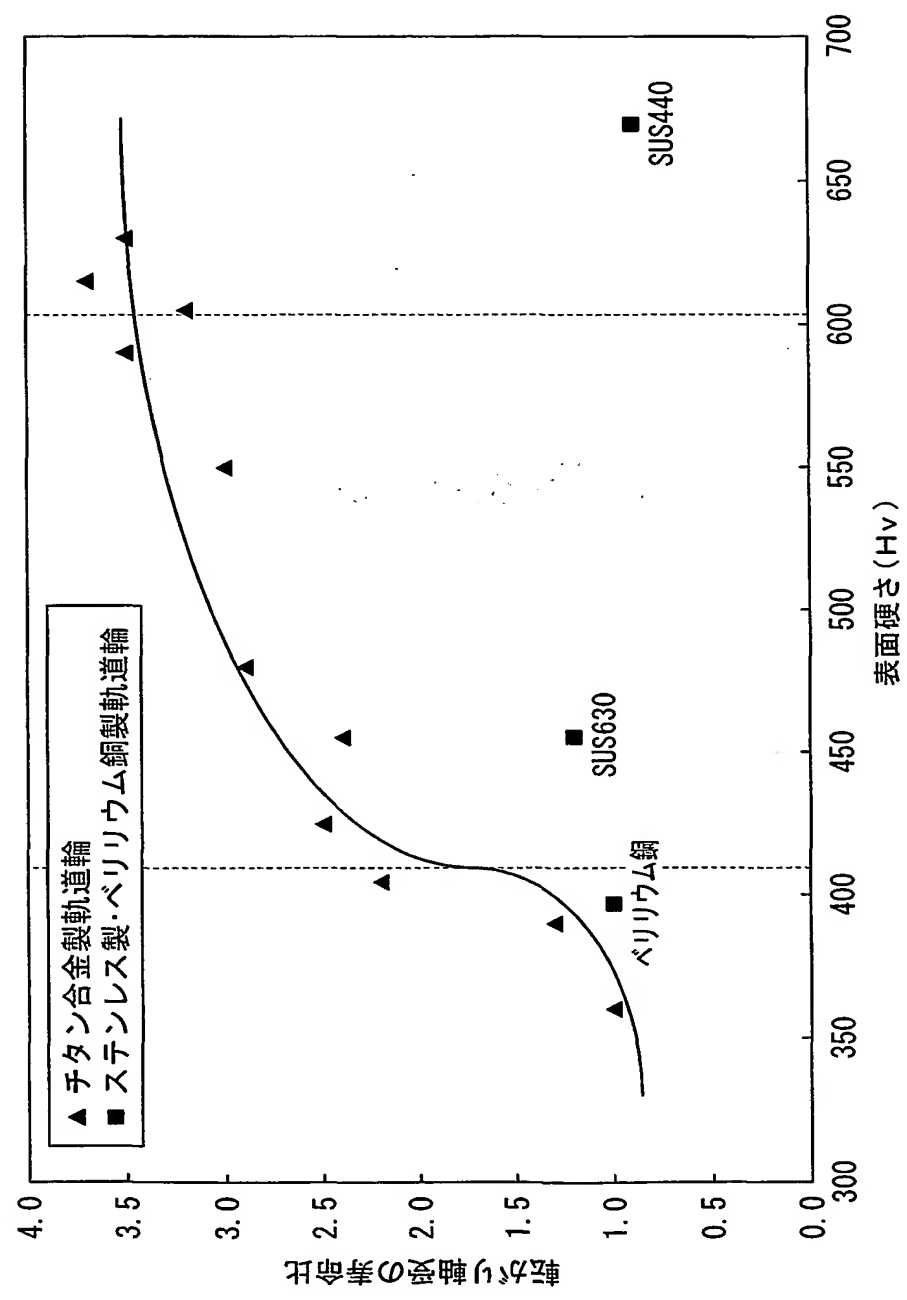
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 3



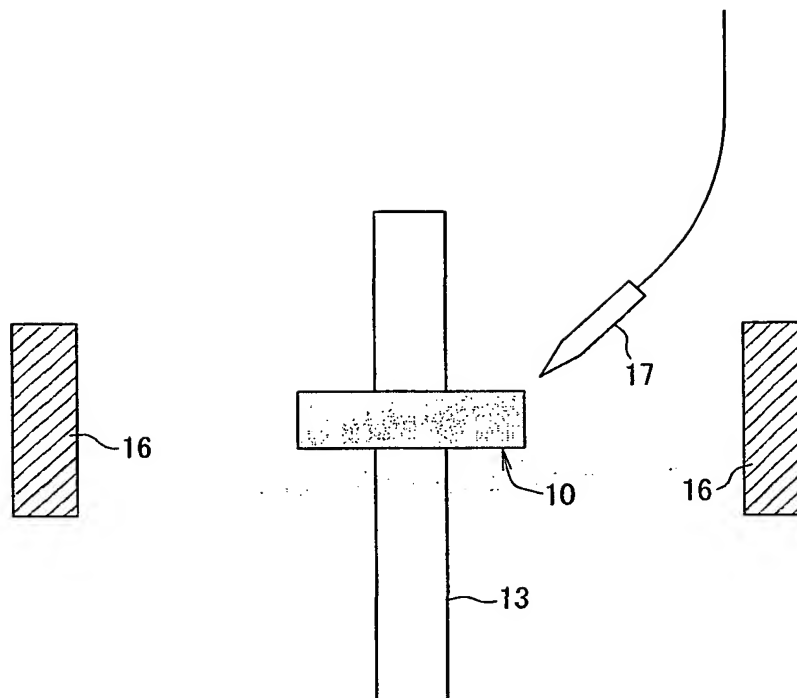
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 4



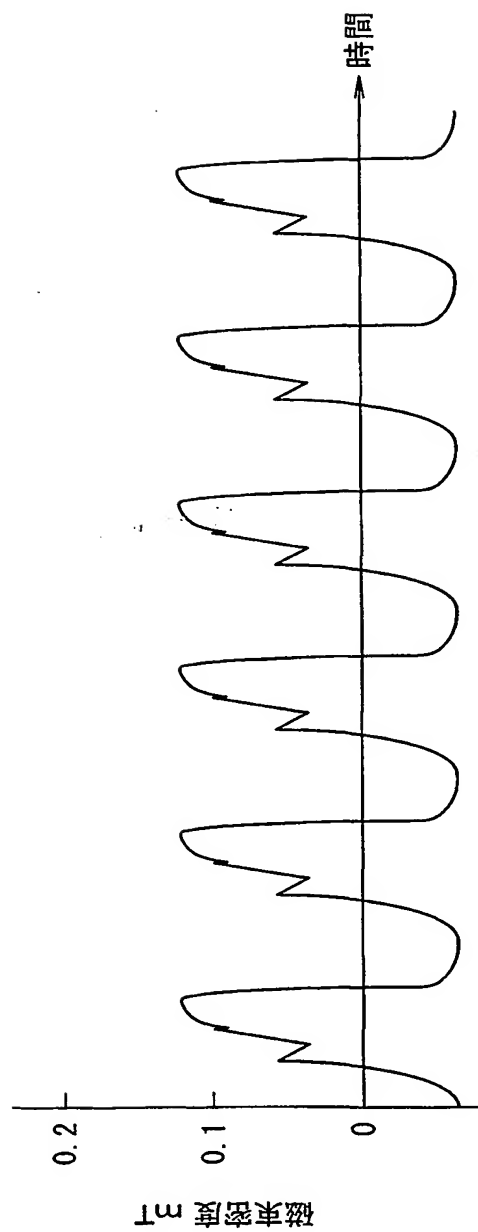
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 5



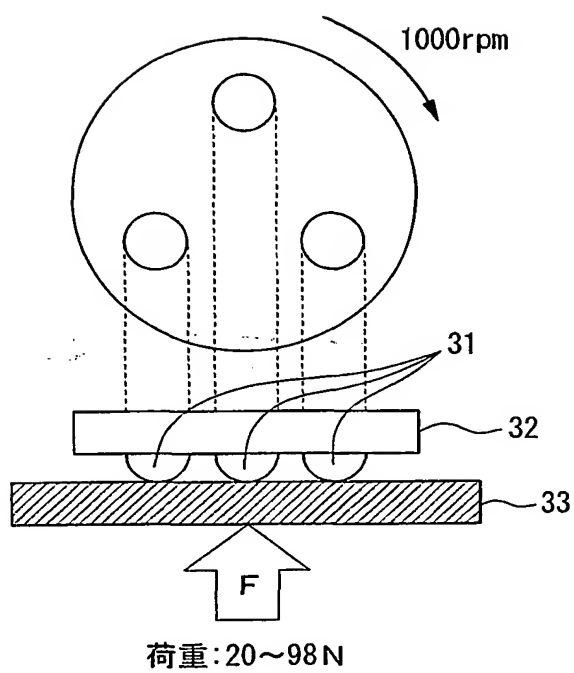
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 6



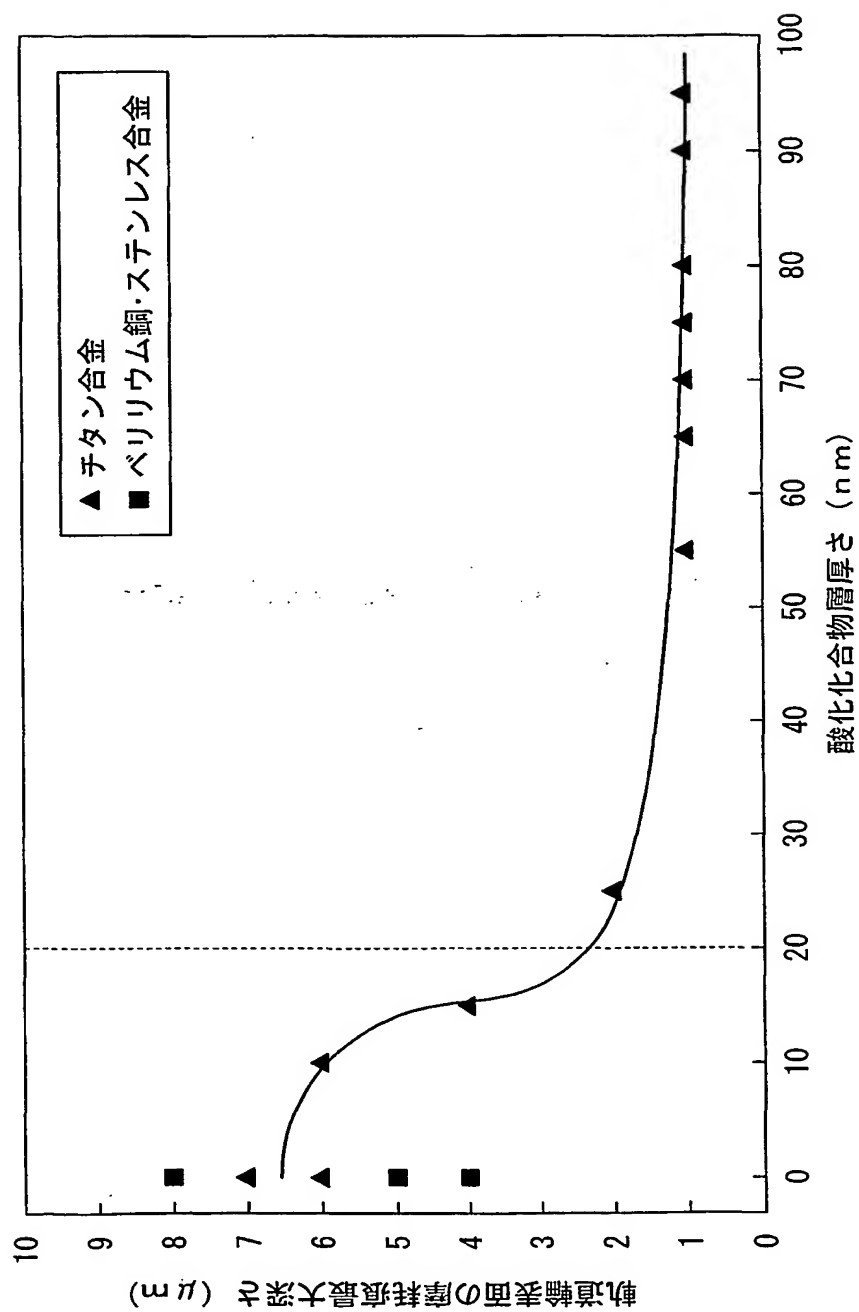
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 7



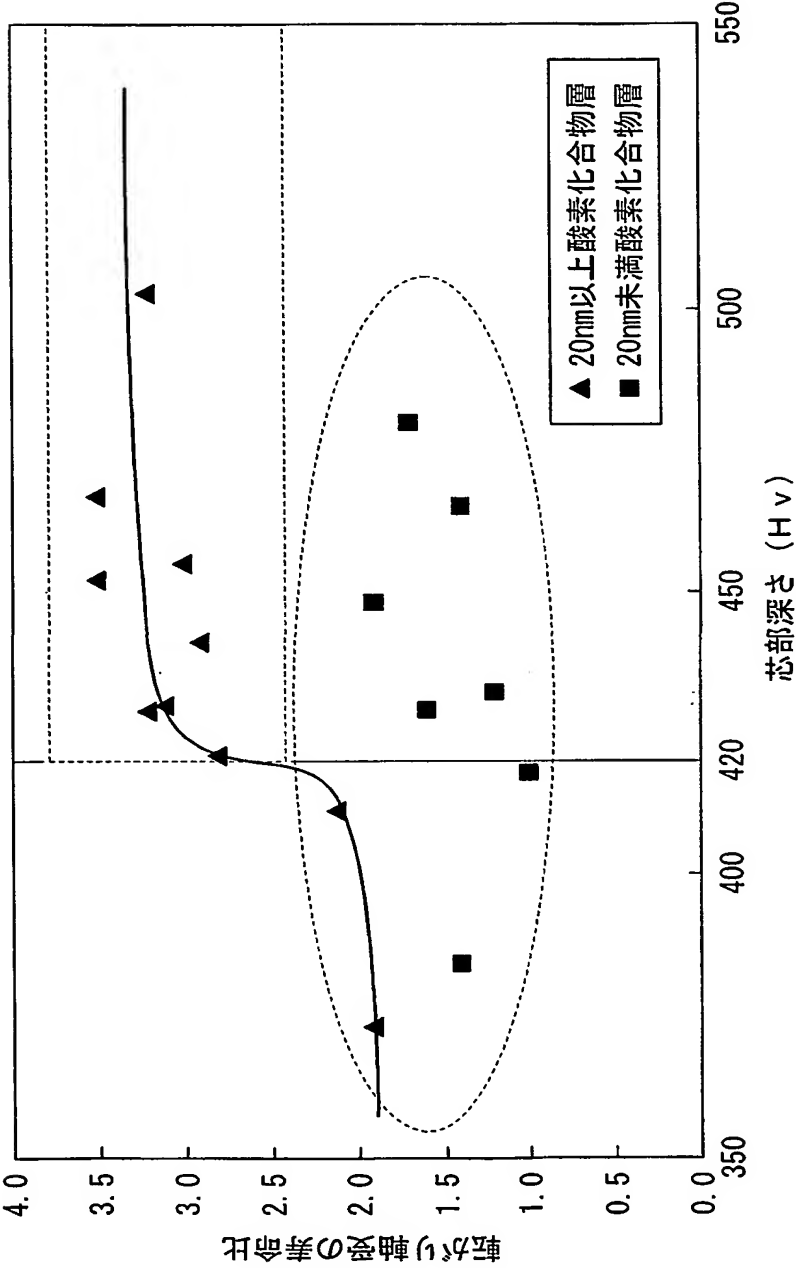
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 8



THIS PAGE BLANK (USPTO)

図 9



THIS PAGE BLANK (USPTO)

図10A

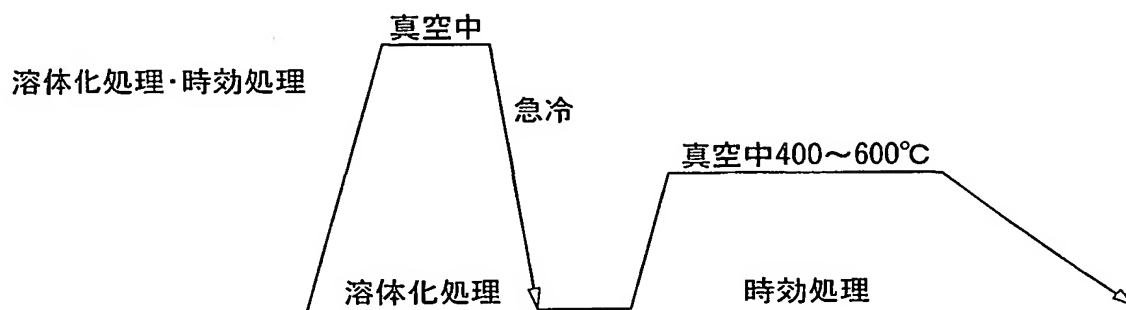


図10B

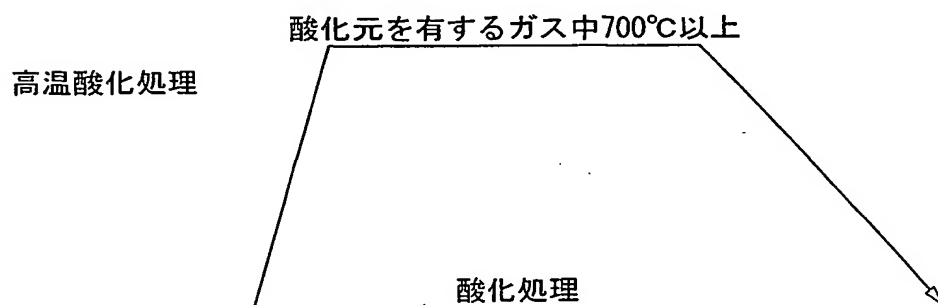
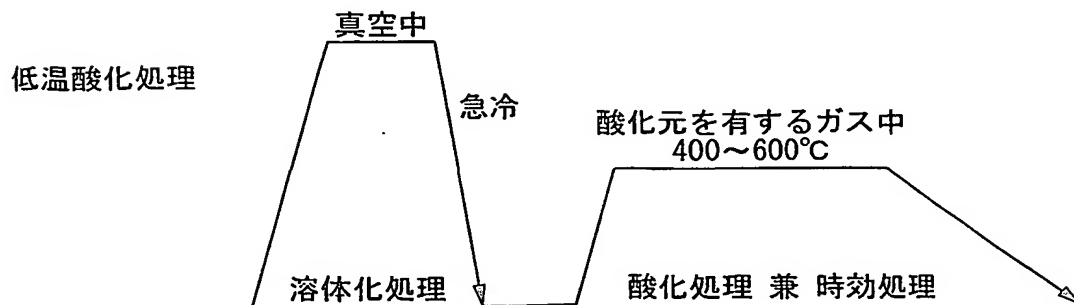


図10C



THIS PAGE BLANK (USPTO)

図11A

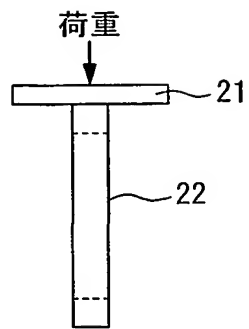


図11B

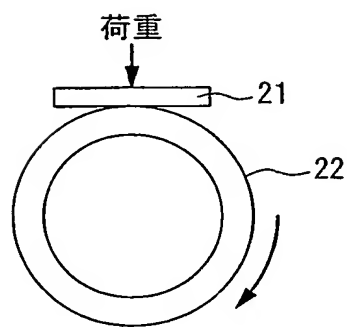
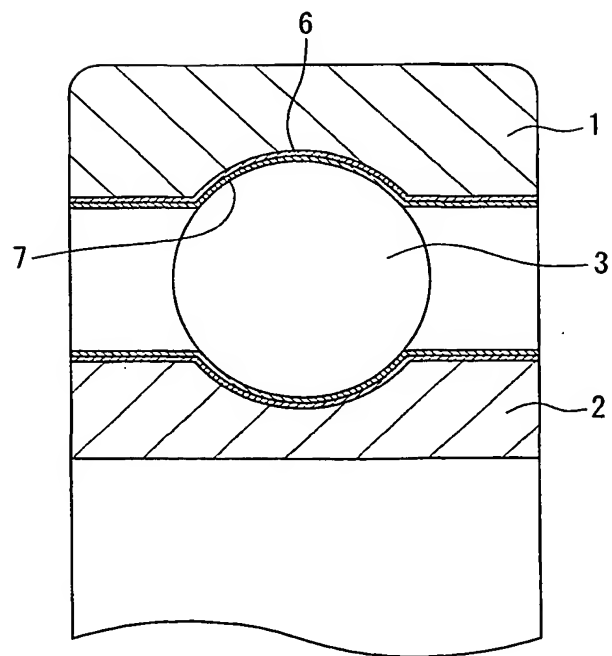
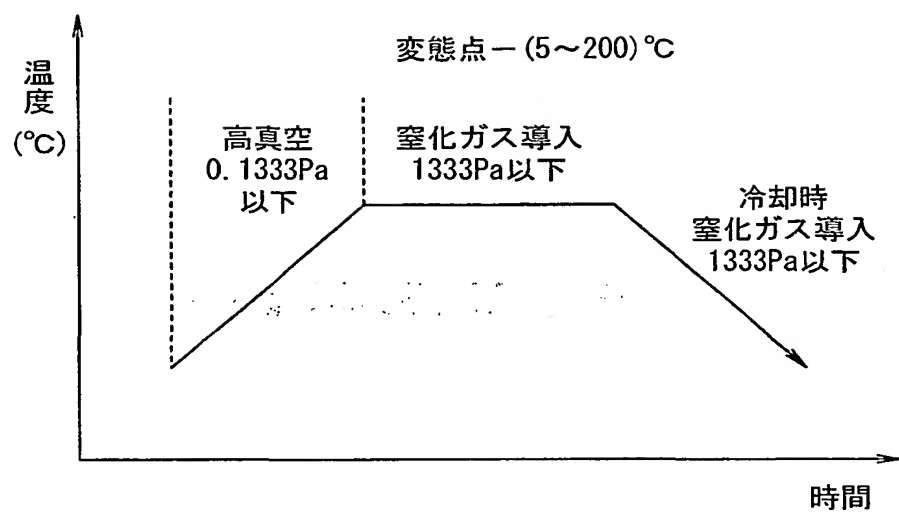


図12



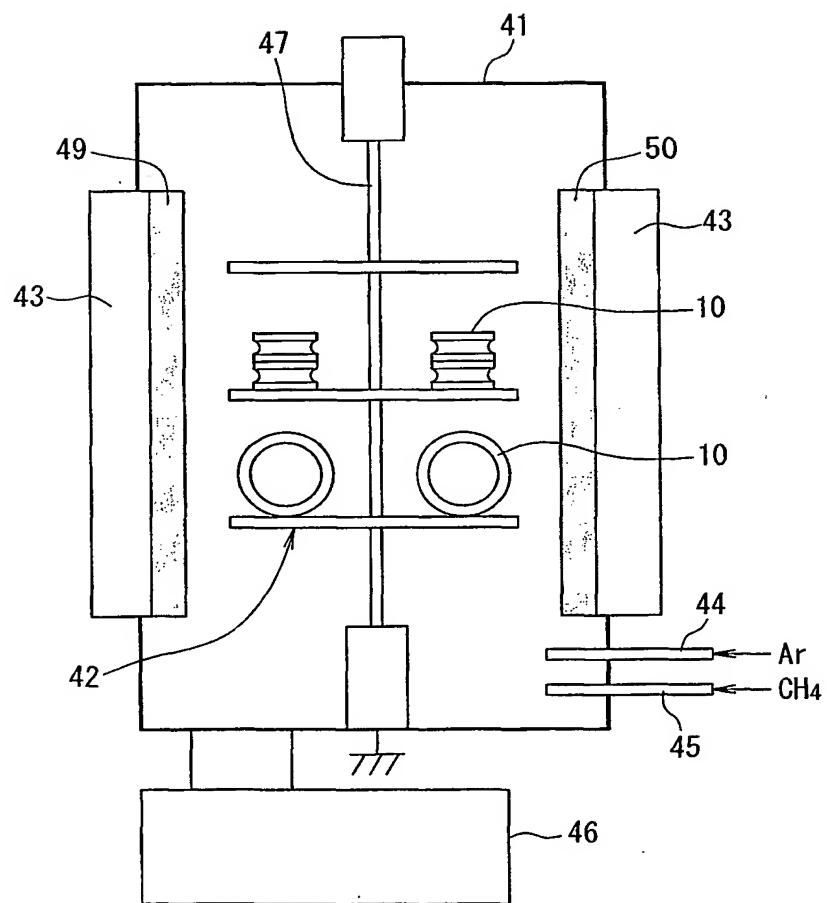
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図13



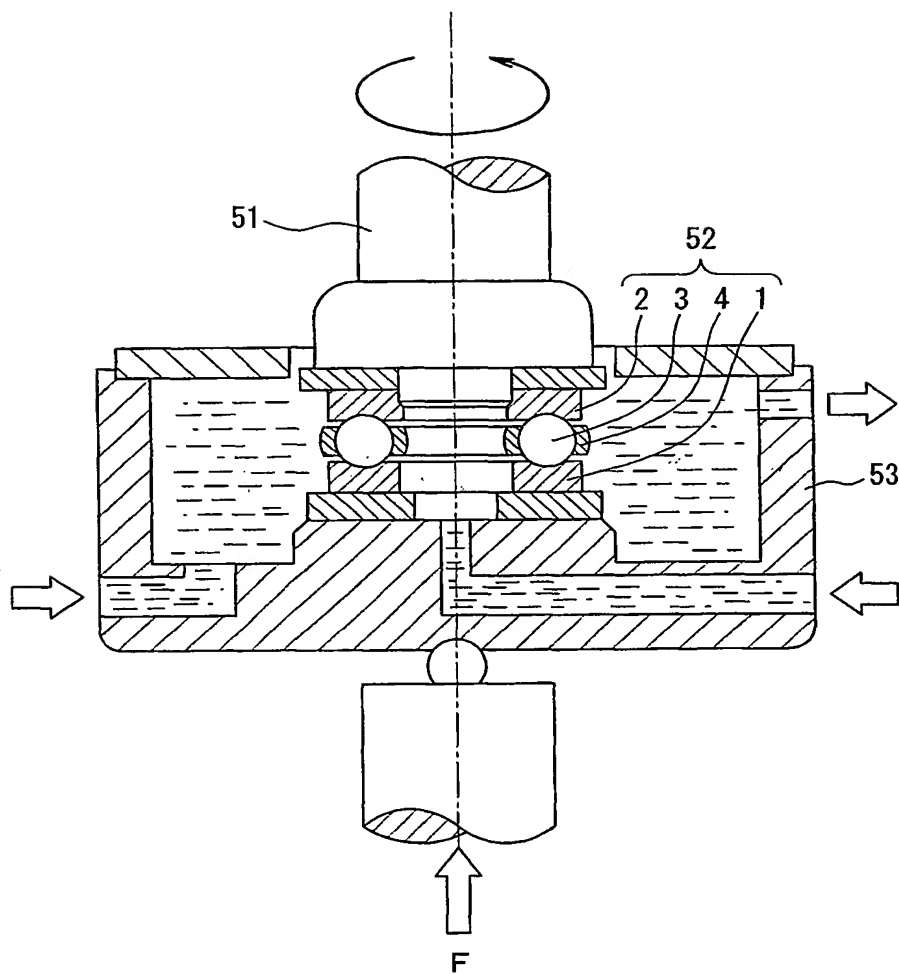
THIS PAGE BLANK (USPTO)

14



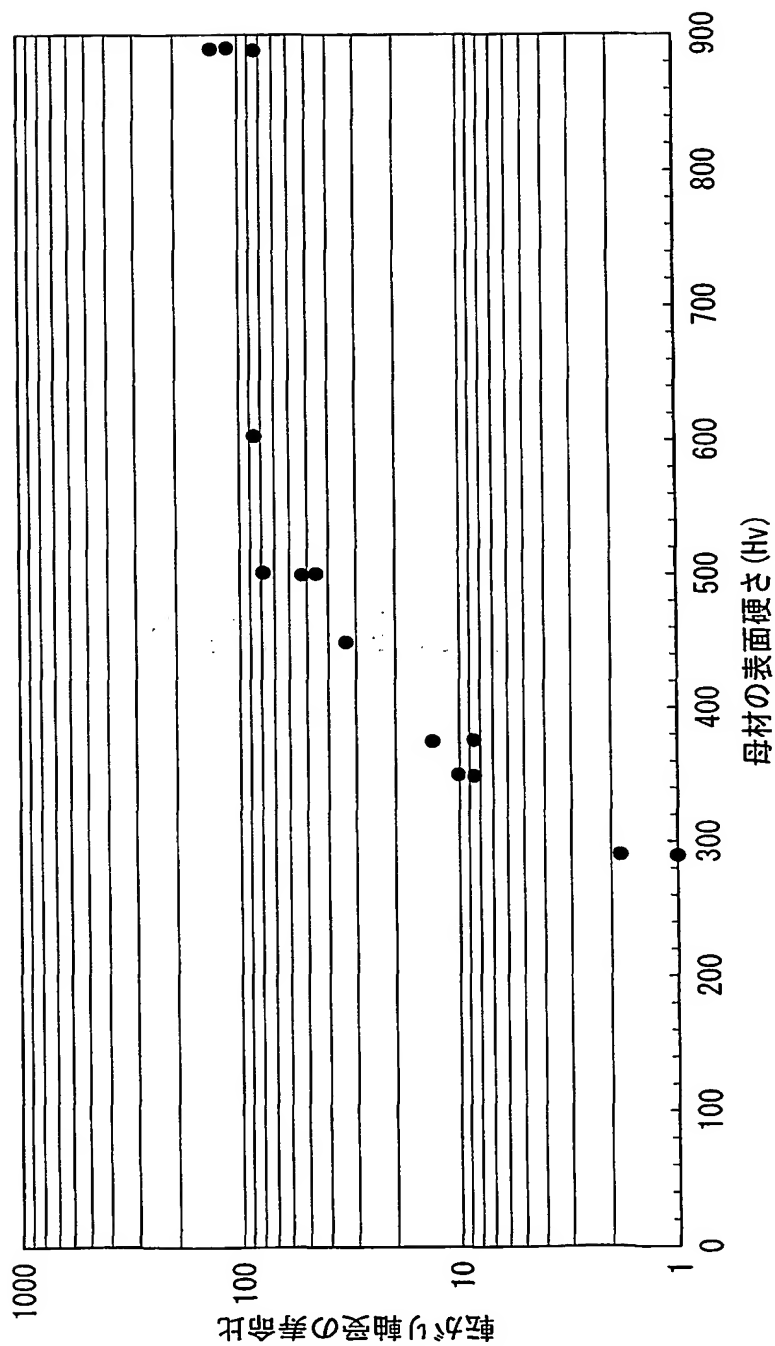
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図15



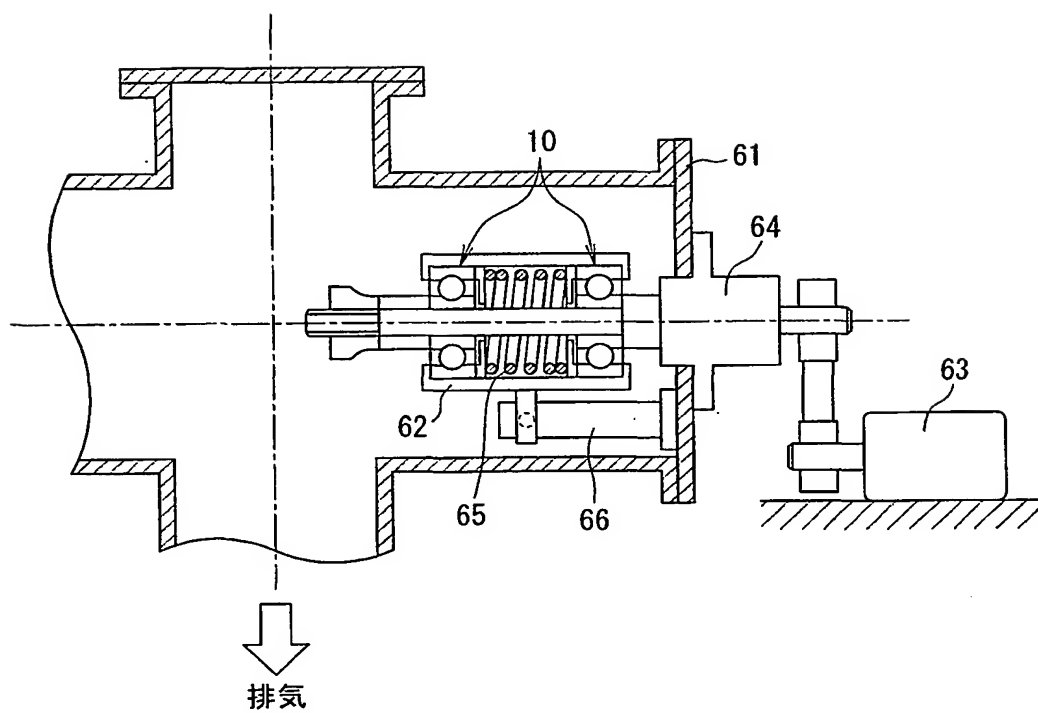
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図16



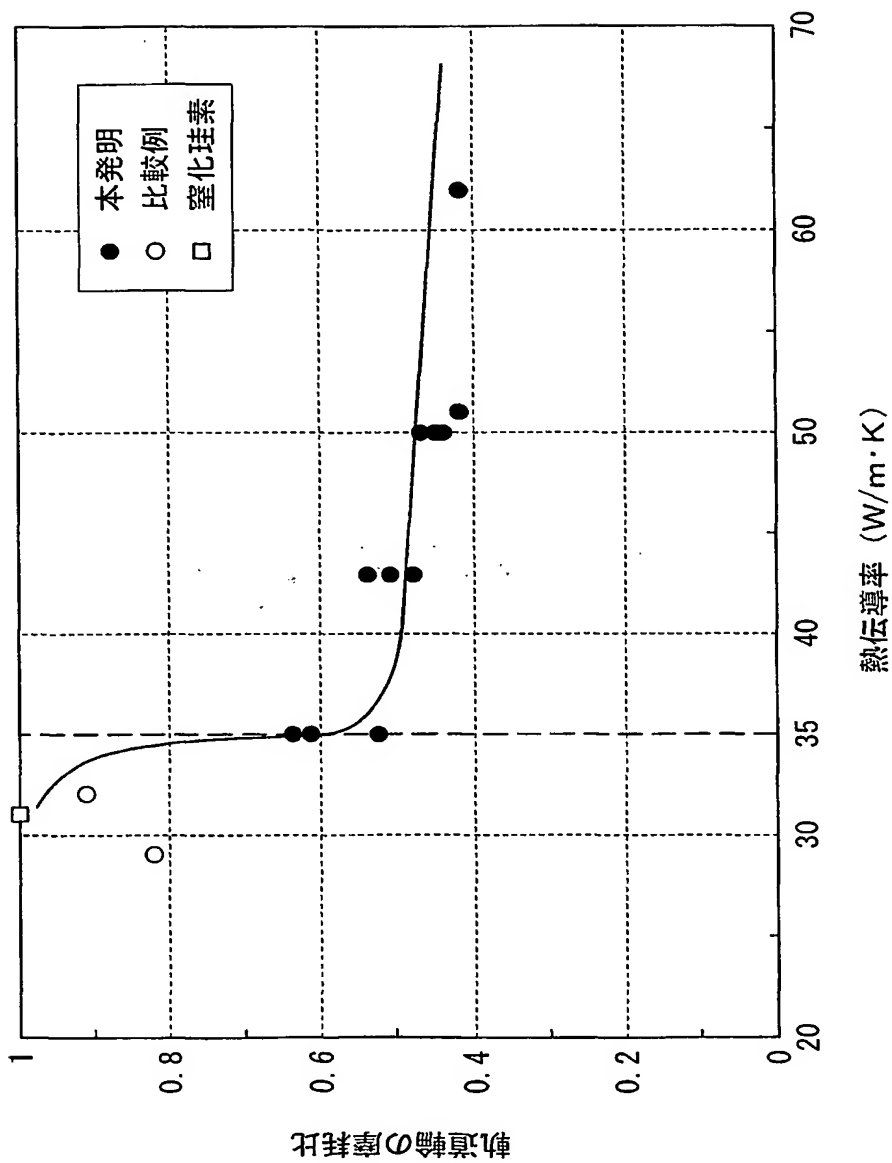
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図17



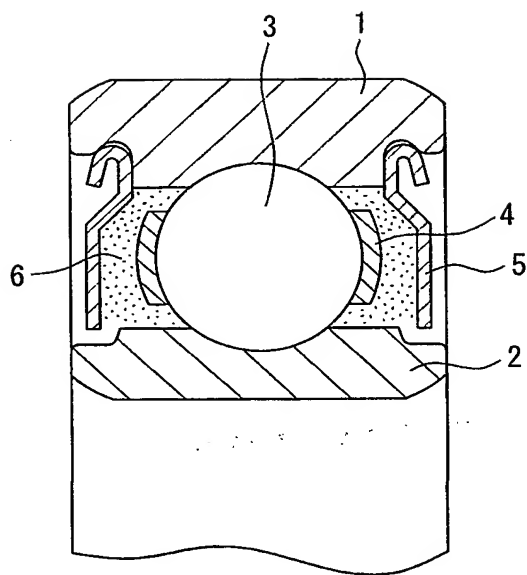
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図18



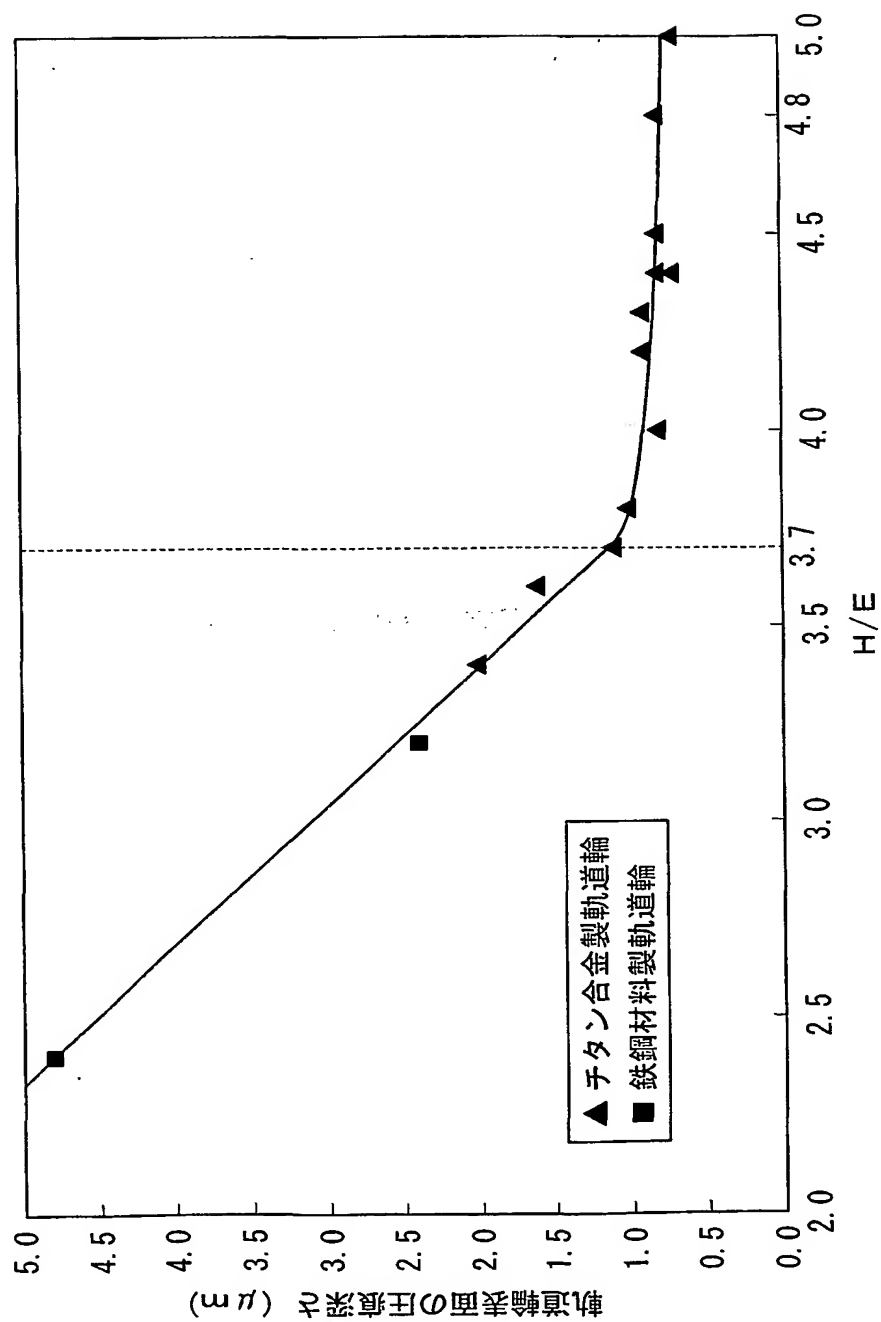
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図19



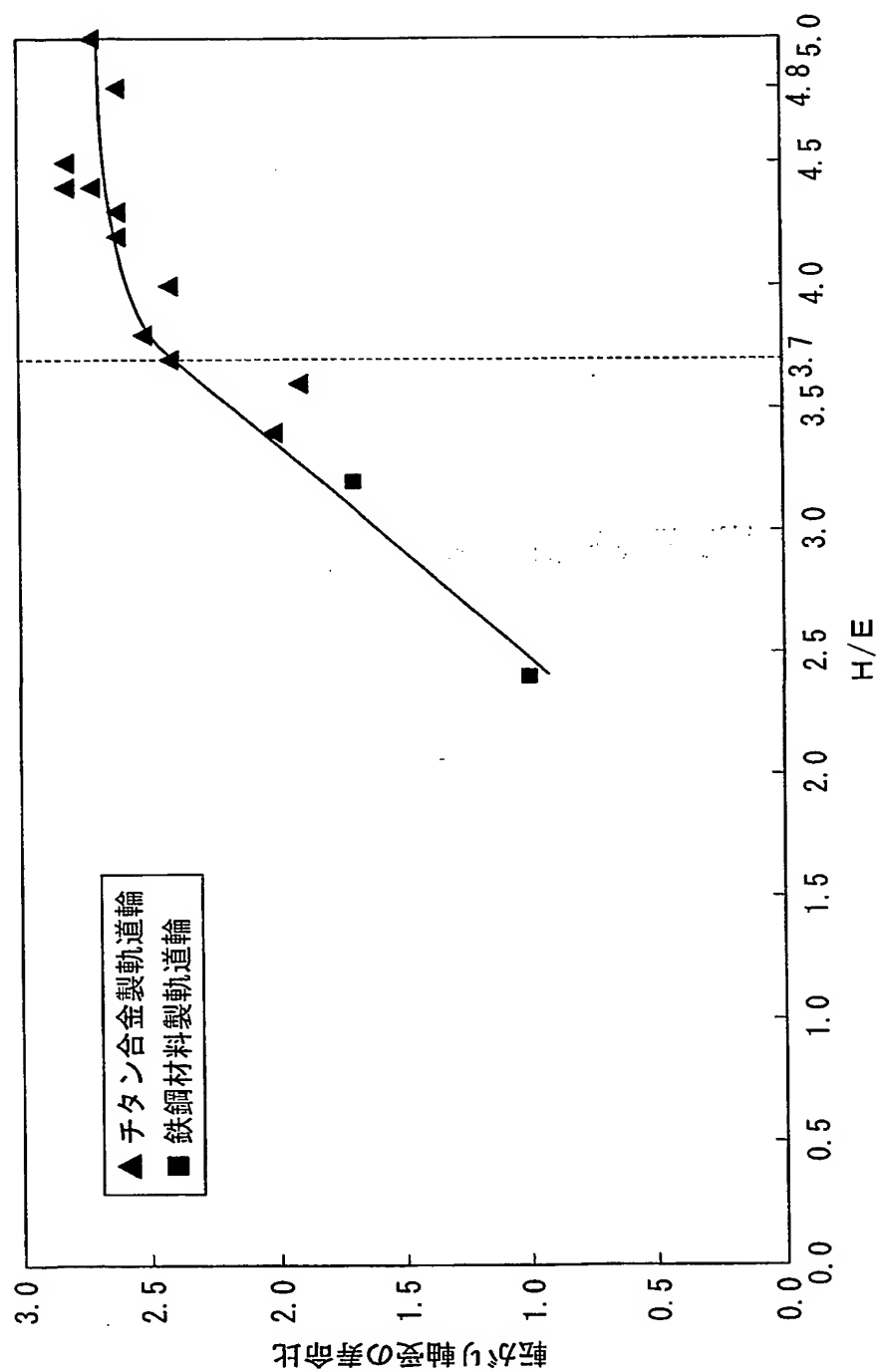
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図20



THIS PAGE BLANK (USPTO)

図21



THIS PAGE BLANK (USPTO)

図22

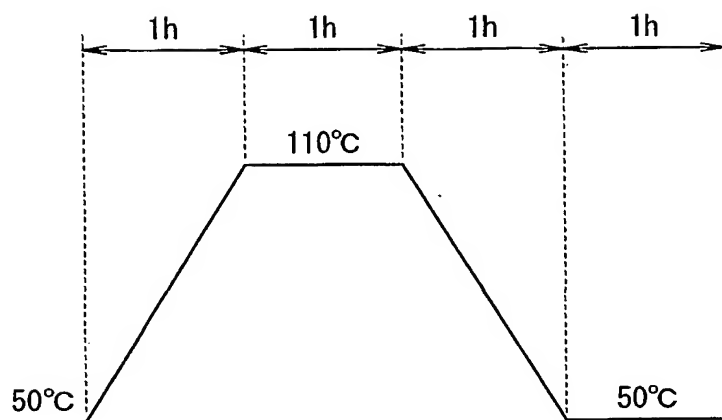
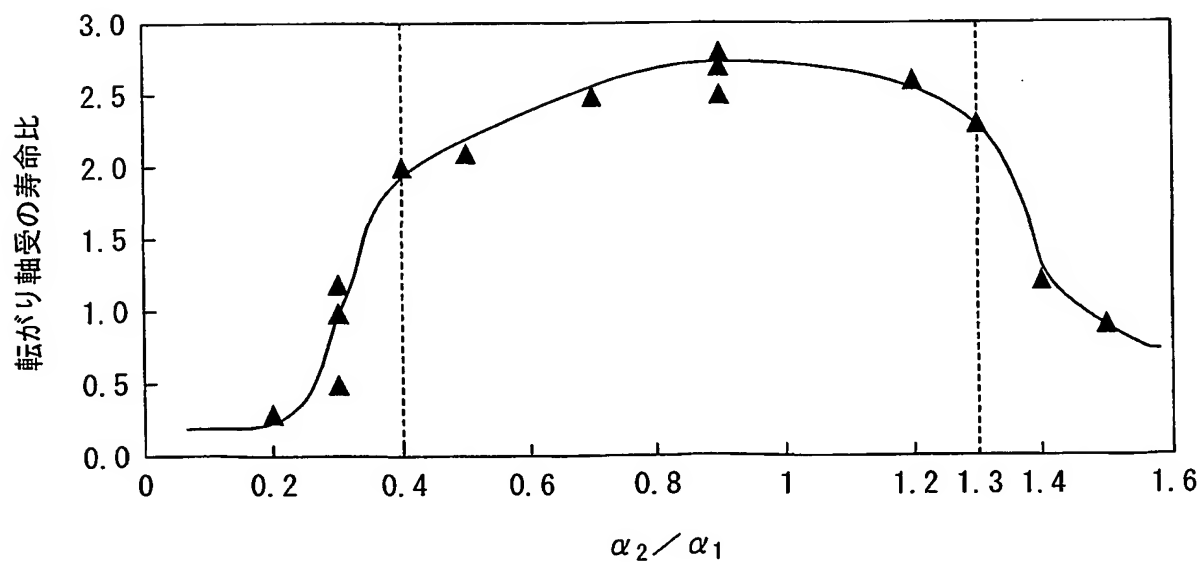
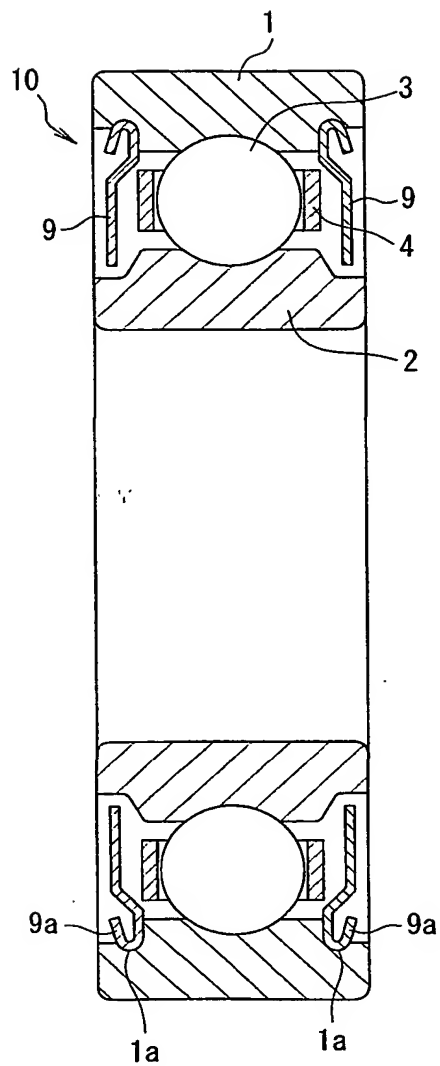


図23



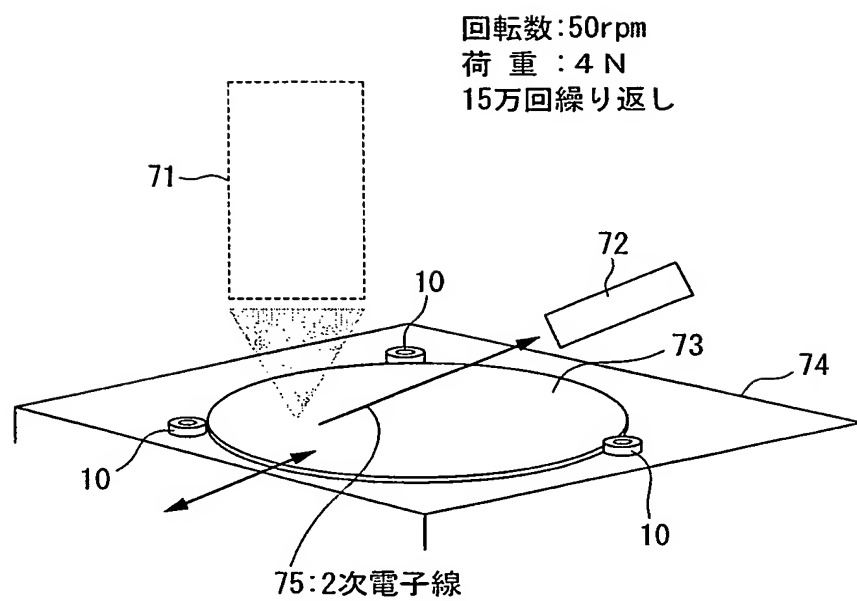
THIS PAGE BLANK (USPTO)

図24



THIS PAGE BLANK (USPTO)

図25



THIS PAGE BLANK (USPTO)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP01/06232

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl.⁷ F16C33/62

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁷ F16C33/00-66

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1926-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2001
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2001	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2001

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 2000-35043 A (NSK Ltd.), 02 February, 2000 (02.02.00), Par. No. [0017], "Rutile-gata Sanka Titanium-sou; Kidou-rin ya Tendou-taino Sozai ha omoni Titanium Goukin to naru"; Par. No. [0022], " α + β -gata, mata ha β -gata Goukin" (Family: none)	1 2-7, 8-30
X Y A	JP 11-223221 A (NSK Ltd.), 17 August, 1999 (17.08.99), Par. Nos. [0069], [0133] (Family: none)	1, 5 8-10 2-4, 6-7, 11-30
Y	JP 7-103247 A (Koyo Seiko Co., Ltd.), 18 April, 1995 (18.04.95), Par. No. [0013], "Shield Buzai no Hyomen ni ha, tatoeba Sanka-titanium" (Family: none)	27
Y	CD-ROM of the specification and drawings annexed to the request of Japanese Utility Model Application No. 62312/1991 (Laid-open No. 14641/1993), (Koyo Seiko Co., Ltd.), 26 February, 1993 (26.02.93), Par. Nos. [0012] to [0014] (Family: none)	7-30

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.
 ☐ See patent family annex.

* "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

 Date of the actual completion of the international search
15 October, 2001 (15.10.01)

 Date of mailing of the international search report
23 October, 2001 (23.10.01)

 Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP01/06232

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 11-247863 A (NSK Ltd.), 14 September, 1999 (14.09.99), Par. Nos. [0019], [0020] (Family: none)	11-16
A	JP 11-153140 A (NSK Ltd.), 08 June, 1999 (08.06.99) (Family: none)	1-30

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. ⁷ F16C33/62

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. ⁷ F16C33/00-66

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2001年

日本国登録実用新案公報 1994-2001年

日本国実用新案登録公報 1996-2001年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X Y	J P 2000-35043 A (日本精工株式会社) 2. 2月. 2000 (02. 02. 00), 【0017】「ルチル型酸化チタン層 ～ 軌道輪や転動体の素材は、主にチタン合金となる。」 【00 22】「 $\alpha + \beta$ 型、又は β 型合金」 (ファミリーなし)	1 2-7, 8-30
X Y A	J P 11-223221 A (日本精工株式会社) 17. 8月. 1999 (17. 08. 99), 【0069】 【0133】 (ファミリーな し)	1, 5 8-10 2-4, 6-7, 11-3 0
Y	J P 7-103247 A (光洋精工株式会社) 18. 4月. 1	27

☒ C欄の続きにも文献が列举されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に関する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

15. 10. 01

国際調査報告の発送日

23.10.01

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

藤原直欣



3W

8919

電話番号 03-3581-1101 内線 3366

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
	995 (18.04.95), 【0013】「シールド部材の表面には、例えば酸化チタン」(ファミリーなし)	
Y	日本国実用新案登録出願3-62312号(日本国実用新案登録出願公開5-14641号)の願書に添付した明細書及び図面の内容を記録したCD-ROM(光洋精工), 26.2月.1993(26.02.93), 【0012】~【0014】(ファミリーなし)	7-30
Y	JP 11-247863 A (日本精工株式会社) 14.9月.1999(14.09.99), 【0019】【0020】(ファミリーなし)	11-16
A	JP 11-153140 A (日本精工株式会社) 8.6月.1999(08.06.99), (ファミリーなし)	1-30